

الفحوصات التشخيصية للمحولات الكهربائية المغمورة بالزيت

م. محمد صبحي عساف



غير مخصص للبيع

2023

مراجعة

المهندس صالح البطاط

الفحوصات التشخيصية للمحولات الكهربائية

المغمورة بالزيت

إعداد

المهندس محمد صبحي عساف

المملكة الأردنية الهاشمية
رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية
(2022/12/6235)

621.314

عساف، محمد صبحي عبدالكريم
الفحوصات التشخيصية للمحولات الكهربائية المغمورة بالزيت / محمد
صبحي عبدالكريم عساف .- الزرقاء: المؤلف، 2022

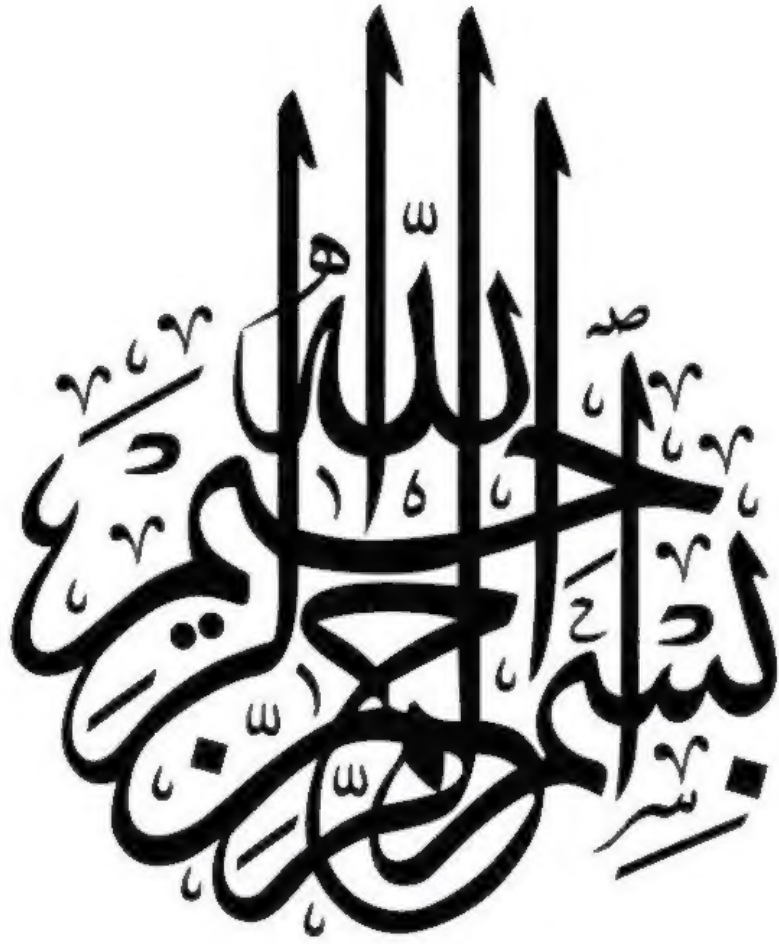
() ص .

ر. إ. : 2022/12/6235.

الواصفات : /المحولات الكهربائية//العزل الكهربائي//الاختبار
الكهربائي//الهندسة الكهربائية/

يتحمل المؤلف كامل المسؤولية القانونية عن محتوى مصنفه ولا يعتبر هذا المصنف
عن رأي دائرة المكتبة الوطنية أو أي جهة حكومية أخرى.

(رسمك) ISBN 978-9923-00-566-8



هذا الكتاب وقف لله تعالى

تمهيد

نحمد الله تعالى، ونستعينه، ونستهديه. ونُصلي ونسلم على سيد المرسلين سيدنا محمد وعلى آله وأصحابه أجمعين، وبعد،،

شرعت في الكتابة مستعيناً بالله ومتوكلاً عليه، بعد الذي رأيت من نقص في المحتوى العربي الذي يتناول هذا النوع من العلوم، فهناك العدد اليسير من الكتب العربية التي تناولت المحولات الكهربائية من الناحية التصميمية أو التركيبية أو كعنصر من عناصر المنظومة الكهربائية؛ ككتب الدكتور محمود الجيلاني والدكتورة كاميليا محمد وغيرهم. أما هذا الكتاب فقد عُني بشرح الفحوصات التشخيصية لمحولات القوى الكهربائية المغمورة بالزيت وأكد لا أجد كتاباً عربياً يشير لهذا الموضوع بشرحه المُفصّل، حيث تم تناول هذا الموضوع من الناحية النظرية والعملية إستناداً إلى أشهر المراجع والمعايير الصادرة عن المعاهد والمنظمات العالمية، كمعهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **IEEE** واللجنة الكهروتقنية الدولية **IEC** والمجلس الدولي للأنظمة الكهربائية الكبيرة **CIGRE**، بالإضافة إلى ما وفقني الله لنيله من الخبرات العملية في سنوات عملي كمهندس صيانة كهربائية في كبرى محطات توليد الطاقة الكهربائية في الأردن؛ كمحطة السمرا لتوليد الكهرباء ومحطة العطارات لتوليد الطاقة الكهربائية بواسطة الحرق المباشر للصخر الزيتي. فما وجدتم من سبق في هذا الكتاب فأعينوني على تصويبه بمراسلتي على بريدي الإلكتروني، فإن أصبت في كتابتي فمن الله وإن أخطأت فمن نفسي والشيطان.

تمت الكتابة باللغة العربية لإثراء المحتوى العربي ولتيسير الفهم على مهندسي وفنيي الكهرباء مع الحفاظ على المصطلحات والمعادلات جميعها باللغة الإنجليزية.

ولا أملك لزوجتي دانية وأبنائي أويس وراكان إلا أن أدعوا لهم بأن يتقبل لهم الله أعمالهم لقاء وقتهم وحقوقهم التي نقصت في ثنایا إعداد هذا الكتاب عن رضى منهم وحب. سائلاً المولى عز وجل أن ينفع بهم وبهذا الكتاب ويقبله خالصاً لوجهه.

إلى أبي وأمي.... عليهما رحمة الله

المهندس محمد صبحي عساف

المقدمة

تُعد المحولات الكهربائية من أهم أجزاء المنظومة الكهربائية لما لها من دور كبير في زيادة موثوقية الشبكة الكهربائية وديمومة سريان التيار الكهربائي، فلو نظرنا بصورة مُعمقة للمنظومة الكهربائية لوجدنا المحولات الكهربائية تلعب دوراً أساسياً في ربط عناصر هذه المنظومة من محطات توليد ومحطات تحويل ومُشتركين كُلاً بمستوى فولتية مناسب له، بل وأي فشل في هذه المحولات سيؤدي لفشل المنظومة كُكل في بعض الحالات. وبناءً على ما سبق ونظراً للتكلفة المرتفعة لمحولات القدرة كان لزاماً علينا أن نولي هذه المُعدّة الإهتمام الكامل وهو منهاجنا في هذا الكتاب، فهناك من الكُتب ما عُنِيَ بشرح المحول من الناحية التصميمية ومنها ما عُنِيَ بالنواحي التشغيلية ومنها ما عُنِيَ بصيانة هذه المحولات. وهذا الكتاب يندرج تحت الكتب التي تُعنى بالصيانة الكهربائية للمحولات، ولتستقيم عملية الصيانة لا بُد من تحديد الأعطال بشكل دقيق لتتم الصيانة بشكل فعال وبأسرع وقت ممكن للتقليل من زمن التوقفات غير المبرمجة للمنظومة الكهربائية. حيث تناول هذا الكتاب الفحوصات التشخيصية اللازمة للكشف عن الأعطال في محولات القوى الكهربائية المغمورة بالزيت.

تم تقسيم الكتاب لثمانية فصول، حيث قمت بتضمين سبعة فحوصات تشخيصية لمحولات القوى الكهربائية في هذا الكتاب وهي من أهم الفحوصات وأكثرها إنتشاراً علي أجد مستقبلاً مُتسعاً من الوقت لتناول باقي الفحوصات في كتاب لاحق.

وكانت فصول الكتاب كالآتي:

- ❖ الفصل الأول : مقدمة في المحولات الكهربائية من الناحية النظرية والعملية.
- ❖ الفصل الثاني : فحص مقاومة العزل.
- ❖ الفصل الثالث : فحص مقاومة الملفات.
- ❖ الفصل الرابع : فحص نسبة لفات المحول.
- ❖ الفصل الخامس : فحص معامل التبديد/القدرة والمواسعة.
- ❖ الفصل السادس : فحص تيار التهييج.
- ❖ الفصل السابع : فحص مُفاعلة التسرب.
- ❖ الفصل الثامن : فحص تحليل الإستجابة الترددية المُسحي.

ولتنيسير الفهم تم التدرُّج في الشرح لهذه الفحوصات وفقاً للمحاور التالية:

- ❖ المحور الأول: مقدمة عامة حول الفحص تتضمن أهمية اللجوء لهذا الفحص بشكل عام وكذلك الجزء من المحول الذي يستهدفه هذا الفحص.
- ❖ المحور الثاني: ذكر المواطن التي يتم إجراء هذا الفحص بها، إلى جانب كونه من الفحوصات التشخيصية.
- ❖ المحور الثالث: بيان الأعطال التي يتم الكشف عنها باستخدام هذا الفحص، بالإضافة إلى الدلائل التي تدفعنا لإجراء هذا الفحص على وجه الخصوص.

- ❖ **المحور الرابع:** توضيح فلسفة الفحص وذلك بالشرح المُفصّل لمبدأ عمل الفحص وطُرقه وأساليبه وتوصيلاته، بالإضافة للأمور التي لا بُد من مراعاتها قبل البدء بالفحص إن وجدت.
- ❖ **المحور الخامس:** بيان خطوات الفحص بالتفصيل.
- ❖ **المحور السادس:** تصحيح القيمة المُقاسة باستخدام المعادلات والجداول.
- ❖ **المحور السابع:** تحليل القيمة المُقاسة بعد تصحيحها، وذلك بالرجوع إلى أشهر المراجع والمعايير العالمية بالإضافة للخبرة السابقة.
- ❖ **المحور الثامن:** أمثلة على نتائج فحوصات مصنعية.
- ❖ **المحور التاسع:** مُلحقات لكيفية الفحص باستخدام أجهزة الفحص المتوفرة والمنتشرة بالسوق العالمية وذلك بذكر خطوات الفحص وتوصيلاته بالجهاز، بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسّط إستناداً على خبرتي بالتعامل مع هذه الأجهزة مُسبقاً. وتَجدر الإشارة أنه في حال استخدام أجهزة الفحص المُشار إليها في الملحقات سابقة الذكر، لا يجب الإعتماد على هذه المُلحقات فقط، بل يجب قراءة الكُتَيّبات التفصيلية الخاصة بهذه الأجهزة والمُزودة بواسطة الشركة المُصنّعة لأجهزة الفحص مثل (MEGGER و METREL و FLUKE و OMICRON) جيداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية والسلامة العامة. مع التنويه على أن حقوق جميع الصور الواردة في هذه الملحقات تعود للشركة المُصنّعة لجهاز الفحص سابقة الذكر، حيث تمت إعادة طباعة هذه الصور وإستخدامها في هذا الكتاب غير المخصص للبيع.
- ❖ **المحور العاشر:** مُلحقات تضم معلومات وجداول تُفيد في توصيلة الفحص أو في تصحيح القيمة المُقاسة.

قائمة المحتويات

الصفحة	العنوان
	تمهيد
	مقدمة
15	الفصل الأول: مقدمة في المحولات
15	ما هو المحول
16	أنواع المحولات
16	مبدأ عمل المحول الكهربائي
18	مبدأ عمل المحول المثالي
22	ضباغات القدرة في المحولات الواقعية
33	الدائرة المكافئة للمحول
36	تركيب المحولات الكهربائية
37	الخزان الرئيسي
44	الجزء الفعال
44	القلب الحديدي
53	الملفات
59	دعائم التثبيت
59	مُغَيِّر الخطوة
68	نظام العزل
75	زيت المحول
80	نظام التبريد
89	عوازل الإختراق أو الجُلْب
99	مُعدات المراقبة و الحماية الفيزيائية المُساعدة
113	المُلحق (1-1) تسمية اطراف المحول وفقاً للمعايير المختلفة
114	المُلحق (1-2) مصادر الاشكال الواردة في الفصل الأول
117	الفصل الثاني: فحص مقاومة العزل
117	متى يتم إجراء هذا الفحص ولماذا؟
118	الدوافع التشخيصية لعمل هذا الفحص وما هي الأعطال التي يتم الكشف عنها
119	فلسفة الفحص
124	أمر لا بُد من مراعاتها قبل البدء بالفحص
126	أساليب الفحص
133	توصيلة الفحص
141	خطوات الفحص

144	تصحيح القيمة المُقاسة
146	تحليل نتائج الفحص
151	العوامل المؤثرة على نتيجة الفحص
154	فحوصات إضافية داعمة
155	تفريغ الملفات وإزالة تمغنط القلب
157	أمثلة على نتائج فحوصات مصنعية
159	المُلحق (2-1) الفحص بواسطة (MIT 1025 10kV by MEGGER)
165	المُلحق (2-2) الفحص بواسطة (TeraOhmXA MI 3210 10kV by METREL)
172	المُلحق (2-3) الفحص بواسطة (1555 10kV Insulation tester by FLUKE)
183	الفصل الثالث: فحص مقاومة الملفات
183	متى يتم إجراء هذا الفحص ولماذا؟
184	الدوافع التشخيصية لعمل هذا الفحص وما هي الأعطال التي يتم الكشف عنها
186	فلسفة الفحص
195	أمور لا بُد من مراعاتها قبل البدء بالفحص
199	طُرُق الفحص
211	خطوات الفحص
214	تصحيح القيمة المُقاسة
216	تحليل نتائج الفحص
221	العوامل المؤثرة على نتيجة الفحص
228	فحوصات إضافية داعمة
229	تفريغ الملفات وإزالة تَمَغْنُط القلب الحديدي
231	أمثلة على نتائج فحوصات مصنعية
234	المُلحق (3-1) أطراف الحقن والقياس لأسلوب (Dual windings أو HV assist)
235	المُلحق (3-2) الفحص بواسطة (AVTM830280 by MEGGER)
242	المُلحق (3-3) الفحص بواسطة (MTO210 by MEGGER)
250	المُلحق (3-4) الفحص بواسطة (TESTRANO 600 by OMICRON)
263	المُلحق (3-5) إزالة المغنطة بواسطة (TESTRANO 600 by OMICRON)
270	الفصل الرابع: فحص نسبة عدد اللفات
270	متى يتم إجراء هذا الفحص ولماذا؟
271	الدوافع التشخيصية لعمل هذا الفحص وما هي الأعطال التي يتم الكشف عنها
271	فلسفة الفحص
279	طُرُق الفحص
282	خطوات الفحص
285	تصحيح القيمة المُقاسة
287	تحليل نتائج الفحص

289	العوامل المؤثرة على نتيجة الفحص
293	فحوصات إضافية داعمة
294	أمثلة على نتائج فحوصات مصنعية
296	المُلحق (4-1) الفحص بواسطة (TESTRANO 600 by OMICRON)
309	المُلحق (4-2) الفحص بواسطة (TTRU3 by MEGGER)
322	المُلحق (4-3) مجموعات التوصيل المختلفة للمحولات (By MEGGER)
334	الفصل الخامس: فحص معامل التبديد/القدرة والمواسعة
335	متى يتم إجراء هذا الفحص ولماذا؟
335	الدوافع التشخيصية لعمل هذا الفحص وما هي الأعطال التي يتم الكشف عنها
337	فلسفة الفحص
347	طُرُق الفحص
350	أساليب الفحص
358	خطوات الفحص
362	تصحيح القيمة المُقاسة
365	تحليل نتائج الفحص
371	العوامل المؤثرة على نتيجة الفحص
377	مواطن العجز في هذا الفحص
379	فحوصات إضافية داعمة
380	أمثلة على نتائج فحوصات مصنعية
382	المُلحق (5-1) الفحص بواسطة (DELTA2000 by MEGGER)
397	المُلحق (5-2) مُقترحات لإختبار فولتية الفحص المناسبة
400	المُلحق (5-3) فولتية التحمّل لفحوصات منخفضة التردد وفقاً للمِيعيار (IEEE)
402	المُلحق (5-4) جداول قِيم معامل تصحيح درجة الحرارة
406	المُلحق (5-5) جداول قِيم (PF) النموذجية لبعض عوازل الإختراق المختلفة
407	المُلحق (5-6) جدول لبعض العوامل المؤثرة على نتيجة فحص (PF/DF)
408	المُلحق (5-7) جدول لبعض العوامل المؤثرة على نتيجة فحص المواسعة (C)
409	المُلحق (5-8) توصيلات الفحص وفقاً لشركة (MEGGER)
415	الفصل السادس: فحص تيار التهييج
415	متى يتم إجراء هذا الفحص ولماذا؟
416	الدوافع التشخيصية لعمل هذا الفحص وما هي الأعطال التي يتم الكشف عنها
417	فلسفة الفحص
423	طُرُق الفحص
427	خطوات الفحص
429	تصحيح القيمة المُقاسة
429	تحليل نتائج الفحص

437	العوامل المؤثرة على نتيجة الفحص
439	فحوصات إضافية داعمة
440	أمثلة على نتائج فحوصات مصنعية
441	المُلحق (6-1) الفحص بواسطة (DELTA2000 by MEGGER)
454	الفصل السابع: فحص مُفاعلة التسرب
456	متى يتم إجراء هذا الفحص ولماذا؟
456	الدوافع التشخيصية لعمل هذا الفحص وما هي الأعطال التي يتم الكشف عنها
457	فلسفة الفحص
461	أساليب الفحص
471	خطوات الفحص
472	تصحيح القيمة المُقاسة
473	تحليل نتائج الفحص
473	العوامل المؤثرة على نتيجة الفحص
474	فحوصات إضافية داعمة
475	المُلحق (7-1) الفحص بواسطة (TESTRAND 600 by OMICRON)
488	المُلحق (7-2) القوى المؤثرة على ملفات المحول وأنماط تشوهها
495	الفصل الثامن: فحص تحليل الإستجابة الترددية المُسحي
496	متى يتم إجراء هذا الفحص ولماذا؟
497	الدوافع التشخيصية لعمل هذا الفحص وما هي الأعطال التي يتم الكشف عنها
498	فلسفة الفحص
504	أساليب الفحص
510	خطوات الفحص
512	معلومات لا بُد من توافرها في تقرير الفحص
513	طبيعة نتائج الفحص
514	تحليل نتائج الفحص
517	أمثلة على أنماط نتائج وفقاً لنوع العطل
527	العوامل المؤثرة على نتيجة الفحص
530	فحوصات إضافية داعمة
531	أمثلة على نتائج فحوصات مصنعية
534	المُلحق (8-1) الفحص بواسطة (FRAX 99 by MEGGER)
546	المُلحق (8-2) جدول لمجموعة من الأعطال التي تؤثر على نتيجة الفحص
547	المُلحق (8-3) جداول بالفحوصات اللازمة تبعاً لنوع المحول المُراد فحصه
550	قائمة المصطلحات
553	قائمة المصادر

الفصل الأول

مقدمة في المحولات



مقدمة في المحولات

نكاد لا نجد مكاناً يسكنه البشر يحلو من المحولات تلك المعدة التي جاوز وجودها المئة عام، وذلك إبتداءً من التطبيقات الصغيرة في المنازل وإنتهاءً بمحولات القوى الكهربائية في محطات توليد الطاقة الكهربائية ومحطات التحويل. فلو نظرنا إلى المنظومة الكهربائية لوجدنا هذه المحولات تلعب دوراً أساسياً في نقل الطاقة الكهربائية لمسافات طويلة، وذات الدور في توزيع هذه الطاقة الكهربائية كمحولات التوزيع واسعة الإنتشار، أي بمعنى آخر أنها تقوم بربط محطات التوليد بشبكة النقل وكذلك ربط شبكة النقل بشبكة التوزيع بالإضافة إلى ربط شبكة التوزيع بالمستهلكين متيحةً عمل هذه الأنظمة من توليد ونقل وتوزيع ومستهلكين على مستوى فولتية ملائم لكل منها.

ومن هذا المنطلق وقبل الحوض بشرح الفحوصات التشخيصية لهذه المحولات، كان لزاماً علينا أن نتطرق لشرح مبسط لهذه المحولات من ناحية مبدأ العمل والتركيب مما يجعل القارئ على معرفة تامة بأجزاء المحول الداخلية والخارجية متيحةً له فهم أوسع للفحوصات وما تكشفه من أعطال في هذا المحول.

1. ما هو المحول

عرّفت اللجنة الكهروتقنية الدولية (IEC) المحول على أنه مُعدّة إستاتيكية - أي أنها لا تحتوي على أجزاء متحركة - تتكون من ملفين أو أكثر، وظيفتها الأساسية تحويل الفولتية والتيار المتردد من مستوى إلى آخر مع ثبات التردد وفقاً لظاهرة الحث الكهرومغناطيسي وذلك لعلايات نقل الطاقة الكهربائية.

حيثُ يقوم المحول بتحويل الطاقة الكهربائية المُطبّقة على ملفاته الإبتدائية إلى طاقة مغناطيسية ثم يُعيد تحويلها إلى طاقة كهربائية في دائرة أخرى وهي الملفات الثانوية، مما يعني أن الملفات الإبتدائية والثانوية للمحول غير مُتصلة كهربائياً وإنما مُتصلة مغناطيسياً عبر القلب الحديدي للمحول فقط.

ومن الجدير بالذكر أن اللجنة الكهروتقنية الدولية (IEC) لا تُفرّق بين المحولات على أساس أنها محولات قوى أو توزيع، وإنما تتعامل مع المحول على أنه مُعدّة وظيفتها تحويل الفولتية والتيار المتردد من مستوى لآخر كما ذكر في تعريف المحول دون التطرّق للتطبيق الذي يشعّله هذا المحول. ولكن تقليدياً ومن المُتعارف عليه أن المحولات الكهربائية المُستخدمة لإيصال الطاقة الكهربائية للمستهلكين بفولتيات قرابة 400 فولت أو أقل عبر ملفاتها الثانوية هي محولات توزيع وأكبر من ذلك هي محولات قوى، ومنهم من ذهب إلى إعتبار أن المحولات ذات فولتية الملفات الإبتدائية التي تصل إلى 725 كيلو فولت كحد أقصى وسعتها تكون عشرات الميجا فولت أمبير هي محولات توزيع وأكبر من ذلك هي محولات قوى حيث تصل فولتية ملفاتها الإبتدائية إلى قرابة 800 كيلو فولت وسعتها مئات الميجا فولت أمبير. وفي هذا الباب الحديث يطول ويطول فمنهم من ذهب إلى إعتبار المحولات ذات السعة الأقل من 500 كيلو فولت أمبير على أنها محولات توزيع والمحولات ذات السعة الأكبر من ذلك على أنها محولات قوى.

ونظراً للتشابه الكبير في التركيب بين محولات القوى والتوزيع بالإضافة إلى التشابه من ناحية الفحوصات الكهربائية وأيضاً لشبوع الزيت المعدني كوسط عازل فيهما، فإنه عند ذكر المحول في هذا الكتاب سيكون

المقصود به محولات القوى والتوزيع المغمورة بالزيت دون تفرقة بينهما وفقاً لرؤية اللجنة الكهروتقنية الدولية (IEC)

2. أنواع المحولات

تنقسم المحولات الكهربائية إلى عدة أقسام رئيسية وفقاً للعديد من المعايير كعدد الأطوار ونسبة تحويل الفولتية ونوع القلب الحديدي ونوع التبريد والوظيفة المُناطة بهذا المحول بالإضافة لموقعه على الشبكة الكهربائية إلى الآتي:



3. مبدأ عمل المحول الكهربائي

عند شرح مبدأ عمل المحول الكهربائي فإن الضياعات (Losses) في القدرة داخل المحول تلعب دوراً كبيراً في زيادة صعوبة فهم مبدأ العمل، وهذا بدوره يُفسر ابتداء أغلب المراجع بشرح مبدأ عمل المحول المثالي (Ideal transformer) عند الحديث عن المحول الكهربائي الواقعي (Actual transformer)، حيث يُعتبر المحول المثالي محول افتراضي غير موجود بالواقع عديم الضياعات و ذو كفاءة تصل إلى (100%) بالمئة، وتم إفتراضه لتيسير شرح وفهم مبدأ عمل المحول الكهربائي الواقعي. وتتلخص خصائص المحول المثالي بالنقاط التالية:

✓ قيمة مقاومة الملفات الابتدائية والثانوية مُساوية للصفر، أي لا وجود للضياعات الناتجة عن هذه المقاومات.

- ✓ قيمة نفاذية مغناطيسية (Permeability) لا نهائية للمادة المكوّنة للقلب الحديدي (Iron core)، أي لا وجود للضبايعات الهستيرية (Hysteresis losses)
- ✓ قيمة الفيض المغناطيسي المُتسرب (Leakage flux) خارج القلب الحديدي (Iron core) مُساوية للصفر، أي أن الفيض المغناطيسي الناشئ عن مرور تيار في الملفات الابتدائية ينتقل بشكل كامل للملفات الثانوية دون وجود فيض مُتسرب على شكل ضبايعات.
- ✓ قيمة التيارات الدوّامية (Eddy currents) في القلب الحديدي (Iron core) و الملفات مُساوية للصفر، أي لا وجود للضبايعات الناتجة عن هذه التيارات.

بناءً على هذه الخصائص يُمكن ملاحظة إهمال ضبايعات القدرة كافّة - المغناطيسية والكهربائية - في المحولات المثالية (Ideal transformers)، ويتم اعتبار القدرة الداخلة للمحول (P_{in}) مُساوية للقدرة الخارجة منه (P_{out}) وكذلك الفولتية على أطرافه (V_1 و V_2) مُساوية للقوة الدافعة الكهربائية المُتولدة من الحث الكهرومغناطيسي (E_1 و E_2) بالترتيب و أيضاً تكون نسبة عدد اللفات (N_1/N_2) مُساوية لنسبة الفولتية (V_1/V_2)

وهذه الخصائص غير موحدة عملياً بالمحولات الواقعية (Actual transformers) نظراً لوجود قيمة لمقاومة الملفات ووجود فيض تسري ووجود تيارات دَوّامية وكذلك صعوبة الحصول على مادة مُكوّنة للقلب الحديدي لانتهائية النفاذية المغناطيسية. لذلك عند دراسة المحول الواقعي (Actual transformer) يجب الأخذ بعين الاعتبار الضبايعات جميعها التي تم إهمالها عند شرح مبدأ عمل المحول المثالي (Ideal transformer).

ونستنتج مما سبق أن المحول المثالي (Ideal transformer) والمحول الواقعي (Actual transformer) يتطابقان بمبدأ العمل ويفترقان بأن المحول المثالي هو محول عديم الضبايعات، أما المحول الواقعي فإنه يحتوي على العديد من الضبايعات في دائريته المغناطيسية والكهربائية والتي سيتم شرحها بالتفصيل لاحقاً في هذا الفصل. ومنه ولتبسيط الأمر يمكن القول أن المحول الواقعي ما هو إلا محول مثالي مُضافاً إليه ضبايعات القدرة جميعها.

$$Actual\ Transformer = Ideal\ Transformer + Losses$$

لذلك سيكون مناجنا في دراسة مبدأ عمل المحول الكهربائي الواقعي أولاً بدراسة مبدأ عمل المحول المثالي وثانياً بشرح ضبايعات القدرة في المحولات الواقعية، و بذلك يكون المُتلقي قد أحاط بمبدأ العمل بالضبايعات وعندها سيكون قادراً على فهم مبدأ عمل المحول الواقعي ورسم الدائرة المُكافئة والمُخطط المُنتجعي الخاص به.

3.1 مبدأ عمل المحول المثالي

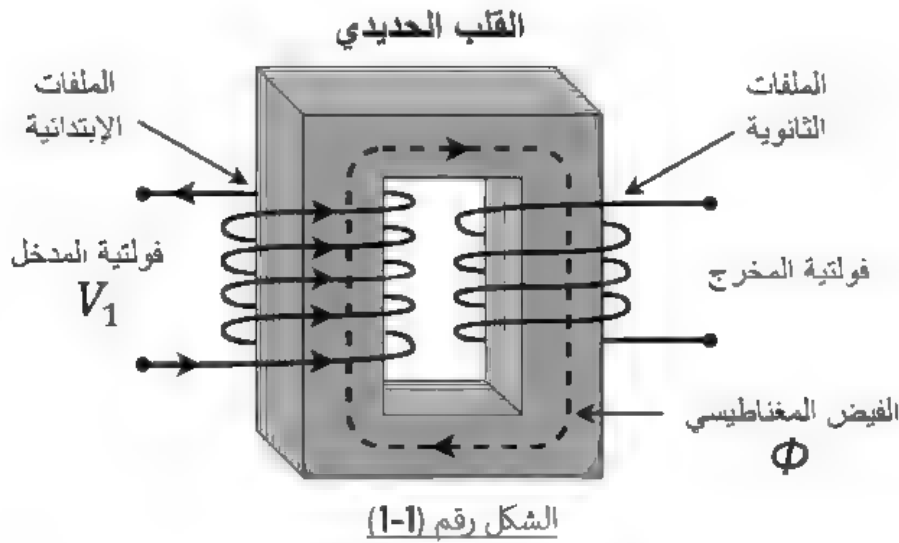
يعمل المحول المثالي (Ideal transformer) وفقاً لظاهرة الحث الكهرومغناطيسي، حيث أن ملفاته الابتدائية تقوم بتحويل الطاقة الكهربائية والمُتمثلة بالفولتية المترددة المُطبقة والتيار الذي يسري في ملفاته الابتدائية إلى فيض مغناطيسي ينتقل عبر القلب الحديدي إلى الملفات الثانوية، ومن ثم يتم تحويل هذا الفيض إلى طاقة كهربائية مرة أخرى مُتمثلة بفولتية مترددة على أطرافه الثانوية أو ما يُسمى بالقوة الدافعة الكهربائية (Electro-Motive Force EMF - e) حسب قانوني فارادى نيومان و لير وفقاً للمعادلة التالية:

$$e = -n \frac{d\phi}{dt} \quad (1.1)$$

حيث:

- e : القيمة اللحظية للقوة الدافعة الكهربائية (فولتية) المُتولدة نتيجة للتغير في الفيض المغناطيسي.
- n : عدد اللفات.
- $\frac{d\phi}{dt}$: معدل تغير الفيض المغناطيسي مع الزمن.

ومنه يُمكن ملاحظة أن القوة الدافعة الكهربائية (EMF - e) الناشئة في سلك ضمن دائرة مُغلقة تتناسب مع مقدار التغير في الفيض المغناطيسي الذي يتعرض له السلك (قانون فارادى-نيومان) وتكون هذه القوة الدافعة الكهربائية مُعاكسة للفيض الذي أنشأها (قانون لير) لذلك وصِغت إشارة السالب في المعادلة (1.1).



وبما أن الفولتية المُطبقة على الملف الابتدائي (V_1) على شكل موجة جيبية، فإن الفيض المُتكون سيكون جيبياً أيضاً أيضاً ($\phi = \phi_M \sin(\omega t)$) حيث (ϕ_M) تُعبّر عن قيمة الفيض العظمى (Peak value).

$$e = -n \frac{d\phi_M \sin(\omega t)}{dt} \quad (1.2)$$

$$e = -n \omega \phi_M \cos(\omega t) \quad (1.3)$$

ولأن قيمة القوة الدافعة الكهربائية (e) قيمة مُتفاوتة كما هو موضح بالمعادلة (1.3) بدلالة وجود $(\cos(\omega t))$ في المعادلة، فلا بُد من إيجاد قيمة الجذر التربيعي لمتوسط القيم المُربعة (Root Mean Square - RMS) وذلك بالقسمة على الجذر التربيعي للعدد إثنان ($\sqrt{2}$)، حتى يتسنى لنا التعامل حسابياً مع هذه القيمة بسهولة ويُسر.

$$E = - \frac{n \omega \phi_M}{\sqrt{2}} \quad (1.4)$$

بتعويض قيمة السرعة الزاوية (ω - Angular speed) المُساوية لـ $(2\pi f)$ بالمعادلة، حيث (f) تُعبر عن التردد لتصبح المعادلة كالتالي:

$$E = - 4.44 n \phi_M f \quad (1.5)$$

كما ويُمكن الإستعاضة عن قيمة الفيض العُظمى (ϕ_M) بقيمة كثافة الفيض العُظمى (B_M) مضروبة بمساحة المقطع العرضي للقلب الحديدي (A) الذي تقطعه خطوط مجال هذا الفيض لتصبح المعادلة:

$$E = - 4.44 n B_M A f \quad (1.6)$$

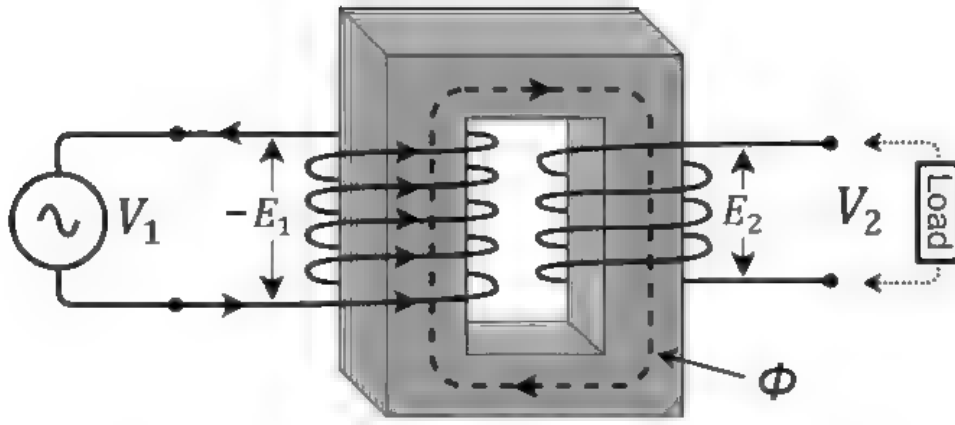
وبذلك نكون قد وصلنا للمعادلتان اللتان توضحان مقدار القوة الدافعة المتولدة في الملفات الإندائية والثانوية بالترتيب:

$$E_1 = - 4.44 n_1 \phi_M f \quad (1.7)$$

$$E_2 = - 4.44 n_2 \phi_M f \quad (1.8)$$

وبقسمة المعادلة (1.7) على المعادلة (1.8) تظهر العلاقة بين الفولتية وعدد اللفات في المحولات المثالية وفقاً للمعادلة التالية:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (1.9)$$

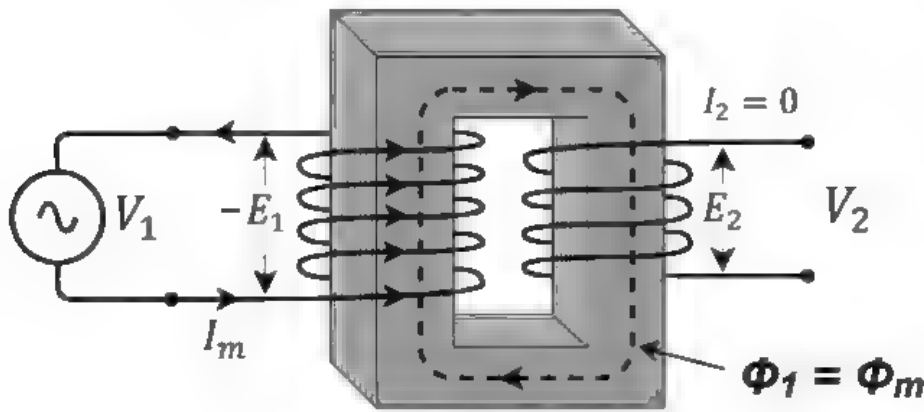


الشكل رقم (1-2)

فعند تطبيق فولتية مترددة على أطراف الملفات الابتدائية لمحول كما هو مبين بالشكل (1-2)، هنالك حالتين للدراسة وهما:

- الحالة الأولى: إذا كان المحول غير موصول بحمل أو ما يُسمى بحالة اللاحمل (No-Load).

في هذه الحالة فإنه عند تطبيق الفولتية المترددة على أطراف المحول الابتدائية يشأ تيار تهيج مغنطة قليل (I_m - Magnetization current) في هذه الملفات مُتَحاً فيض مغناطيسي ابتدائي (ϕ_1)، وفي حالتنا هذه حالة اللاحمل يُكون هو نفسه الفيض المغناطيسي المشترك (ϕ_m) وذلك لعدم وجود فيض مغناطيسي ثانوي (ϕ_2) نتيجة لعدم مرور تيار في الدائرة الثانوية المفتوحة للمحول - لعدم وجود حمل -



الشكل رقم (1-3)

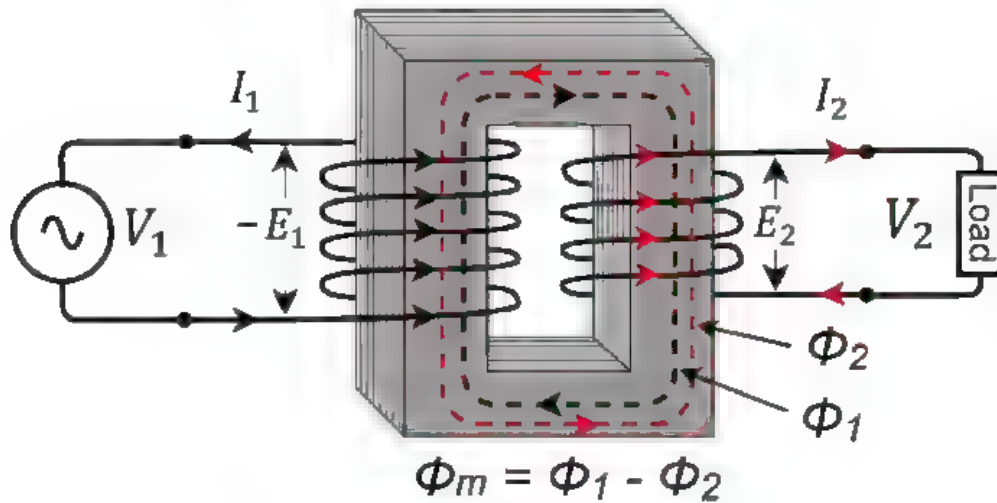
حيث أن هذا الفيض المغناطيسي المشترك (ϕ_m) الذي ينتقل شكل كامل إلى الملفات الثانوية عبر القلب الحديدي سيؤدي لظهور قوة دافعة كهربائية مُعاكسة (E_2 و $-E_1$) في الملفات الابتدائية و الثانوية نتيجة لقطع هذا المجال لَهَذين الملفين. فلو نظرنا إلى الملفات الابتدائية سجد قيمتين للفولتية، إحداهما قيمة الفولتية المُطبقة فولتية المصدر و المشار إليها بالرمز (V_1) و الأخرى هي الفولتية المتولدة نتيجة لتأثير الفيض المشترك (ϕ_m) على الملفات الابتدائية أو ما يُسمى بالقوة الدافعة الكهربائية (E_1)، حيث تكون

هذه القوة الدافعة الكهربائية مُعاكسة لقيمة الفولتية المُطبقة (V_1) حسب قانون لير، أي أن الفولتية المُحصلة ($V_1 - E_1$) المُطبقة على الملفات الابتدائية تكون قليلة مما يُفسّر ظهور تيار تهييج مغنطة قليل (I_m) وهذا ما يُعرف بظاهرة القوة الدافعة الكهربائية المُعاكسة (Back EMF).

أما فيما يخص الملفات الثانوية، فإن الفيض المُشترك (ϕ_m) سيؤدي لظهور قوة دافعة كهربائية (E_2) على أطراف هذه الملفات كما هو مبين بالشكل (1-3).

• الحالة الثانية: إذا كان المحول موصول بحمل (Loaded).

في هذه الحالة فإنه عند تطبيق الفولتية المترددة على أطراف المحول الابتدائية يشأ تيار تهييج - مغنطة (I_m) في هذه الملفات و فيض مغناطيسي ابتدائي (ϕ_1) يقطع الملفات الثانوية مُنتجاً قوة دافعة كهربائية فيها (E_2) و فولتية على أطراف المحول الثانوية - أطراف الحمل - مقدارها (V_2) مما يعني نشوء تيار في الملفات الثانوية (I_2)، ووفقاً لقانون لنز فإن هذا التيار (I_2) الناشئ عن مرور فيض مغناطيسي (ϕ_1) سيُنتج فيضاً مغناطيسياً (ϕ_2) معاكساً للفيض الأصلي (ϕ_1) بالإتجاه، ليُصبح الفيض المغناطيسي المُشترك أو المُحصّل في القلب الحديدي (ϕ_m) مساوٍ للفيض المغناطيسي الابتدائي (ϕ_1) مطروح منه الفيض المغناطيسي الثانوي (ϕ_2) أي أن هذا الفيض المُشترك (ϕ_m) سيتعرض للهبوط لحظياً كما هو مبين بالشكل (1-4).



الشكل رقم (1-4)

وبما أن قيمة الفيض المغناطيسي المُشترك أو المُحصّل (ϕ_m) تعرضت للهبوط فإن قيمة القوة الدافعة الكهربائية الناشئة في الملفات الابتدائية ($-E_1$) سوف تتعرض للهبوط أيضاً، وذلك يعني زيادة الفولتية المُحصلة المُطبقة على الملفات الابتدائية ($V_1 - E_1$) مما يؤدي لزيادة التيار في الملفات الابتدائية (I_1). وهذه الزيادة في التيار الابتدائي (I_1) سيصاحبها زيادة في قيمة الفيض المُشترك أو المُحصّل (ϕ_m) و المساوي لـ ($\phi_1 - \phi_2$) نتيجة لزيادة قيمة الفيض الابتدائي (ϕ_1)، وهذا ما يُسمى بالـ (Transformer Action).

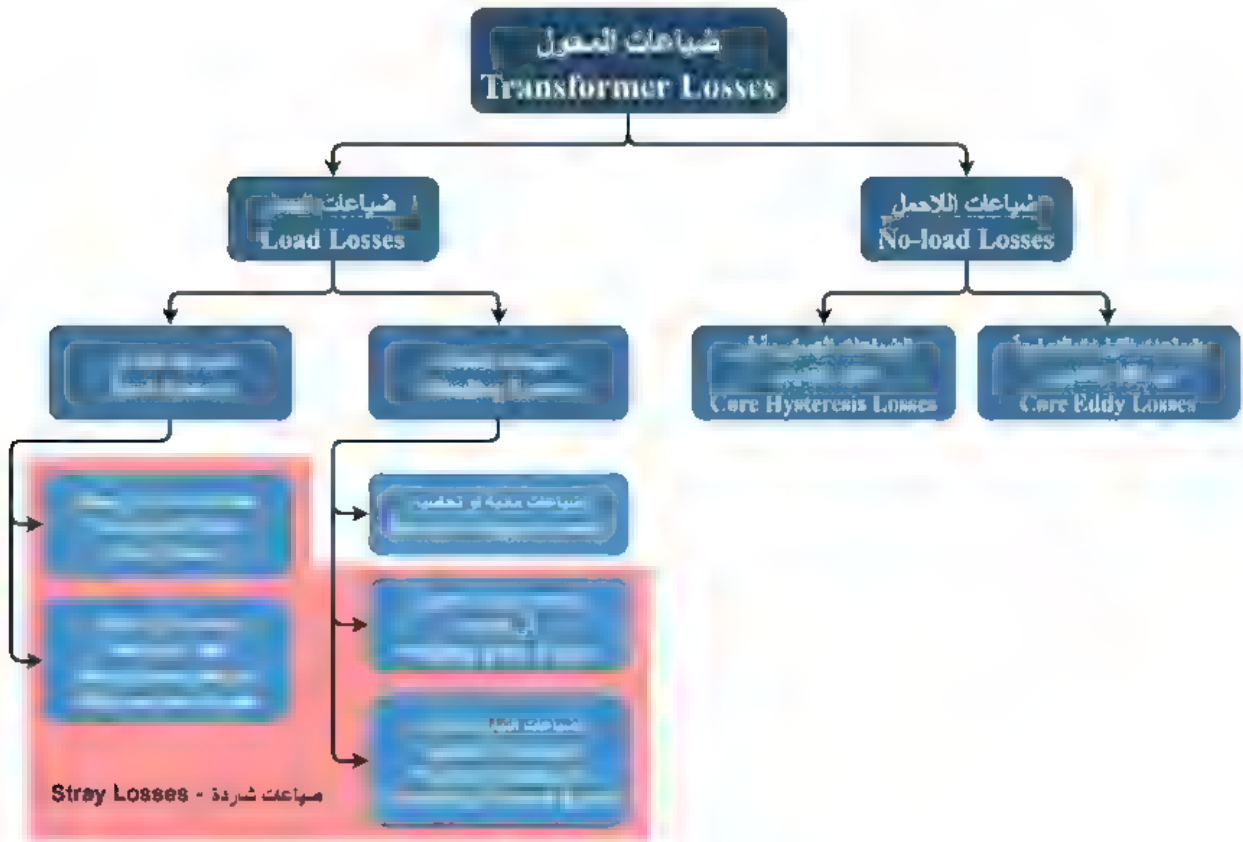
ومنه يمكن القول أن الفيض المُشترك أو المُحصّل (ϕ_m) يكون ذو قيمة ثابتة في القلب الحديدي.



ملحوظة (1-1): الشرح السابق يَصْلُح أن يكون جواباً لسؤال "كيف يتحسس المحول وجود حمل على أطرافه الثانوية ويقوم تلقائياً بزيادة التيار الابتدائي والثانوي؟"

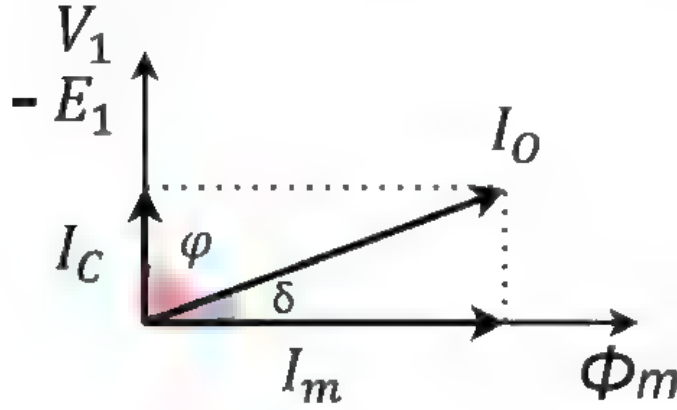
3.2 ضياعات القدرة في المحولات الواقعية

كما هو معلوم أن القدرة الفعالة الداخلة للمحولات الواقعية (P_{in}) لا تُساوي القدرة الفعالة الخارجة منها (P_{out})، وذلك نتيجة لضياعات الدائرة الكهربائية والمغناطيسية التي تتعرض لها هذه المحولات حيث تنقسم الضياعات داخل المحول كما هو مبين بالرسم الآتي:



• ضياعات اللاحمل – No-Load Losses

عند تطبيق الفولتية الإسمية بالتردد الإسمي على أطراف الملفات الابتدائية للمحولات المثالية (Ideal transformers)



الشكل رقم (1-5)

ينشأ تيار تهيج - مغنطة (I_m) فقط ويكون هذا التيار مسؤول عن تشكيل الفيض في القلب الحديدي أو ما يُسمى بمغنطة القلب الحديدي، ويكون مُطابق مُتجهياً (in-phase) للفيض المغناطيسي المُشترك (ϕ_m) ومُزاح مُتجهياً بمقدار (-90°) عن القوة الدافعة الكهربائية $(-E_1)$.

أما فيما يخص المحولات الواقعية (Actual transformers) فهناك مركبة

تيار أخرى تنشأ بالإضافة إلى تيار التهيج المغنطة (I_m) سابق الذكر وهو تيار ضياعات القدرة أو القلب (Power/Core loss current) أو ما يُسمى أيضاً بتيار الضياعات الثابتة (Fixed loss current) ويُرمز له بالرمز (I_c) ويكون مُزاح مُتجهياً بمقدار $(+90^\circ)$ عن الفيض المغناطيسي (ϕ_m) ومُطابق مُتجهياً (in-phase) للقوة الدافعة الكهربائية $(-E_1)$ وذو قيمة أقل من تيار التهيج - المغنطة (I_m) كما هو مبين بالشكل (1-5)، والمجموع المُتجهي (Vector sum) لهذين التيارين (I_c) و (I_m) يُساوي تيار اللاحمل أو الدائرة المفتوحة (I_0) والذي يكون مُزاح مُتجهياً عن الفيض المُشترك (ϕ_m) بزاوية تُسمى زاوية الصياعات $(\delta - \text{Loss Angle})$ ، ومُزاح مُتجهياً عن القوة الدافعة الكهربائية بزاوية تُسمى زاوية الطور $(\varphi - \text{Phase Angle})$ ويكون أيضاً ذو قيمة قليلة إذ يتراوح مقداره $(1\% - 2\%)$ من التيار الإسمي للمحولات الكبيرة

ملحوظة (1-2): بالإضافة إلى مُسمى ضياعات اللاحمل (No-load losses) هنالك تسميات أخرى تم ذكرها مُسبقاً وهي ضياعات القلب (Core losses) و ضياعات القدرة (Power losses) و الضياعات الثابتة (Fixed losses) نظراً لثباتها في حالي اللاحمل والحمل، حيث سيتم الإستعانة بمُسمى ضياعات القلب (Core Losses) في سياق الشرح وسيُقصد بها جميع ما سبق من المُسميات لهذا النوع من الضياعات.



ملحوظة (1-3): هنالك مُركبة ضياعات عادةً ما يتم إهمالها في حالة اللاحمل وهي المُركبة الناتجة عن مقاومة ملفات المحول $(I_0^2 R)$ ، وذلك نظراً لمقدار تيار اللاحمل القليل المار في هذه الملفات والذي بدوره يؤدي لضياعات داخل هذه الملفات قليلة ومُهملّة.



ويُشير تيار ضياعات القلب (I_c) سابق الذكر إلى مُركبتين رئيسيتين من مركبات الصياعات داخل القلب الحديدي وهما:

○ ضياعات التيارات الدّوامية في القلب الحديدي - Eddy Currents Losses

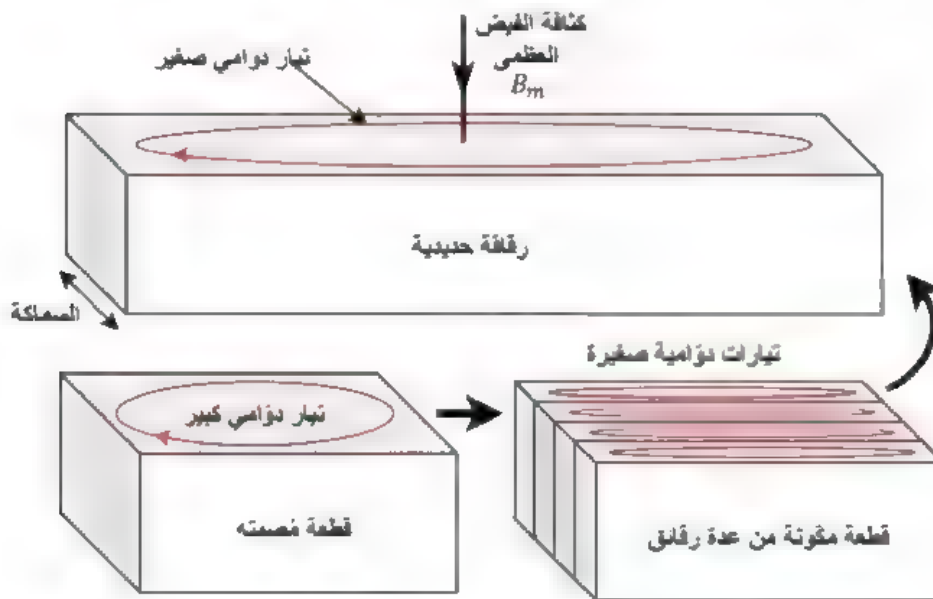
وهي أولى أنواع ضياعات اللاحمل، فوفقاً لطاهرة الحث الكهرومغناطيسي والتي تُنص على أنه " إذا تعرض سلك مادة موصلة في دائرة مُعلقة إلى فيض مغناطيسي مُتغيّر، ستنشأ فيه قوة دافعة كهربائية (EMF - e) تتناسب مع مقدار التعيّر في هذا الفيض " ومنه فإن القلب الحديدي للمحول (Iron core) ما هو إلى مادة موصلة والفيض في المحول يقطعها كما يقطع الملفات، لذلك ستنشأ فيه قوة دافعة كهربائية والتيارات تُعرف بالتيارات الدّوامية (Eddy currents - I_E) لا يُستفاد منها بل وتؤدي إلى إرتفاع درجة حرارة القلب الحديدي.

وتعتمد قيمة هذه الضياعات على حجم دّوامية التيار الدّوامي ونوع المادة المُستخدمة في تصنيع القلب الحديدي للمحول - مقاومة المادة لسريان التيار - وكذلك تتناسب مع قيمة تردد العولتية المُطبقة على المحول وسُمك الرقائق المُكوّنة للقلب الحديدي للمحول كما يُظهر بالمعادلة (1.10). لذلك ذهب مُصمموا المحولات إلى خفض قيمة هذه التيارات الدّوامية وما ينتج عنها من ضياعات بواسطة الطرق التالية:

✓ جعل القلب الحديدي يتكون من رقائق رقيقة (Laminations) مُتراصة وموصولة مع بعضها على التوازي ومُعزولة فيما بينها بمادة الورنيش كما سيتم شرحه لاحقاً، مما يُقلل من حجم الدّوامية كما هو موضح بالشكل (1-6) ويُقلل من قيمة العولتية الناتجة والتيار، وبالطبع قيمة الضياعات الناتجة عن هذه التيارات.

✓ إضافة عنصر السيليكون (Silicon - Si) إلى المادة المُكوّنة للقلب الحديدي ينسب مُعيّنة لا تتجاوز الـ (5%) مما يَزيد من مقاومة القلب لمرور التيار الكهربائي ويحدّ من هذه التيارات الدّوامية خافضاً معه قيمة الضياعات (I^2R).

وعادة ما يتم الجمع بين هاتين الطريقتين عند تصميم المحولات حتى نصل إلى قيمة ضياعات تيارات دّوامية أقل بكثير من قيمة الضياعات الهستيرية أو ما يُسمى بضياعات التباطؤ التي سيتم شرحها.



الشكل رقم (1-6)

ويُمكن حساب قيمة هذه الضياعات بالإعتماد على المُعادلة التالية [AREVA Power transformers expertise Vol.2]

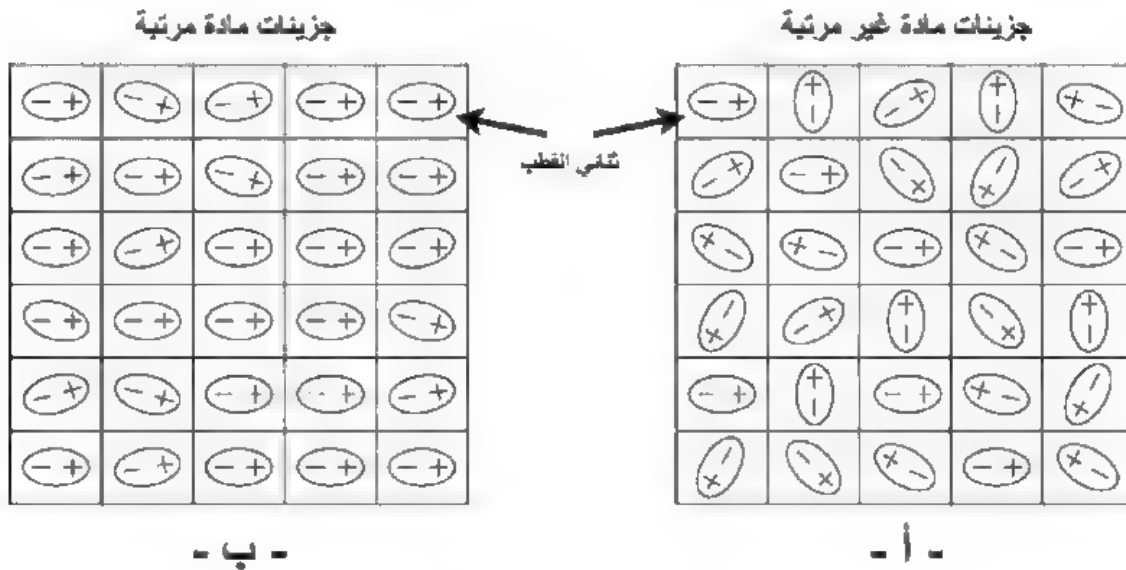
$$P_e = k_e f^2 t^2 B_M^2 \quad (1.10)$$

حيث:

- P_e : مقدار ضياعات التيارات الدوامية (Eddy current losses) لكل كيلوجرام من الحديد (w/kg).
- k_e : ثابت يعتمد على نوعية الحديد المُستخدم في القلب وعدة ما تتراوح قيمته من 200 إلى 1000.
- f : التردد (Hz).
- t : سُمك الرقائق المُكوّنة للقلب الحديدي (m).
- B_M : القيمة العظمى لكثافة الفيض المغناطيسي (T).

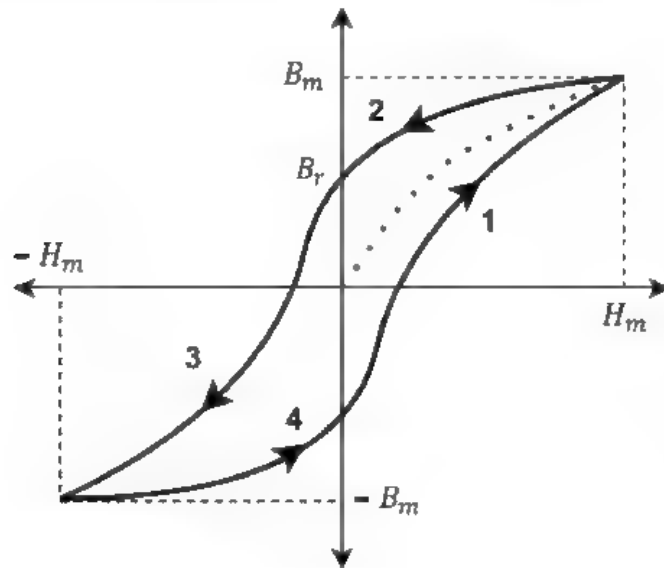
○ الضياعات الهستيرية في القلب الحديدي - Hysteresis Loss

وهي ثاني أنواع ضياعات اللاحمل، فوفقاً لنظرية الفيزيائي الفرنسي (بيير وايس) أو ما يُسمى بنظرية الجزيئات ثنائية القطب في المعنطيسية الحديدية (Domain theory in ferromagnetism)، فإن المعادن المغنطيسية أو القابلة للمغنطة مثل الحديد والكوبلت والنيكل تتكون بتركيبها من جزيئات ثنائية القطب وتكون موزعة مُتجهياً بشكل عشوائي داخل المادة كما هو موضح في الشكل [(1-7) (أ)]، وبعد تعرّض هذا المعدن لمجال مغنطيسي تقوم هذه الجزيئات بالإصطفاف باتجاه المجال المُطبّق كما هو موضح في الشكل [(1-7) (ب)].



الشكل رقم (1-7)

و بما أن التيار والفولتية المُطبقة على المحول مُتغيرة مع الزمن فإنه عند انعكاس إتجاه التيار و انعكاس إتجاه المجال المغناطيسي المؤثر على جزيئات المادة، جُزء من هذه الجزيئات يُغيّر إتجاهه مع المجال الجديد الناتج من انعكاس التيار و يبقى جُزء بسيط على وضعيته و بحاجة إلى قدرة إضافية لتغيير إتجاهه



الشكل رقم (1-8)

مع إتجاه المجال الجديد، وهذا ما يُسمى بالمغناطيسية المُتبقيّة (Residual magnetism) أو (Remanence - B_r) كما هو مُوضح بمنحنى $(B - H)$ أو $(\phi - mmf)$ في الشكل (1-8).

وتُعتبر هذه القُدرة اللازمة لتغيير إتجاه (إعادة ترتيب) جزيئات المادة المُكوّنة للقلب الحديدي للمحول نوع من أنواع الضياعات داخل المحولات الكهربائية وتُسمى بالضياعات الهستيرية أو ما يُسمى بضياعات التباطؤ والتي تؤدي لإرتفاع درجة حرارة القلب الحديدي

للمحول، حيث تتناسب المساحة المُحصورة في الشكل (1-8) مع مقدار الضياعات في القدرة الناتجة عن هذه الخاصية الهستيرية. وهذا بدوره يُفسّر تأخر موجة الميخ المغناطيسي عن موجة الفولتية المُطبقة.

و تُعتمد قيمة هذه الضياعات على نوع المادة المُستخدمة في تصنيع القلب الحديدي للمحول وكذلك تتناسب مع قيمة تردد الفولتية المُطبقة على المحول كما يظهر بالمعادلة (1.11)، لذلك ذهب مُصمموا المحولات إلى خفض قيمة هذه الضياعات بواسطة الطرق التالية:

✓ إضافة عنصر السيليكون (Silicon - Si) إلى المادة المُكوّنة للقلب الحديدي ينسب مُعيّنة لا تتجاوز (5%) مما يُحسن الخصائص المغناطيسية للمادة ويُقلل من قيمة الضياعات الناتجة عن هذه الخاصية.

✓ تخليص المادة المُكوّنة للقلب الحديدي من الشوائب وخاصة عنصر الكربون.

✓ توجيه حبيبات المادة المُكوّنة للقلب الحديدي (Grain-orientation) والتي سيتم الحديث عنها لاحقاً.

ويُمكن حساب قيمة هذه الضياعات بِدقة للترددات (50 & 60 Hz) هيرتز بالإعتماد على المعادلة التالية الواردة في [AREVA Power transformers expertise Vol.2]:

$$P_h = k_h f B_M^n \quad (1.11)$$

حيث؛

P_h : مقدار الضياعات الهستيرية لكل كيلوجرام من الحديد (w/kg).

k_e : ثابت يعتمد على نوعية الحديد، المُستخدم في القلب ومقدار كثافة الفيض المغناطيسي وعادة ما تتراوح قيمته من 3×10^{-3} إلى 20×10^{-3} .

f : التردد (Hz).

B_M : القيمة العظمى لكثافة الفيض المغناطيسي (T).

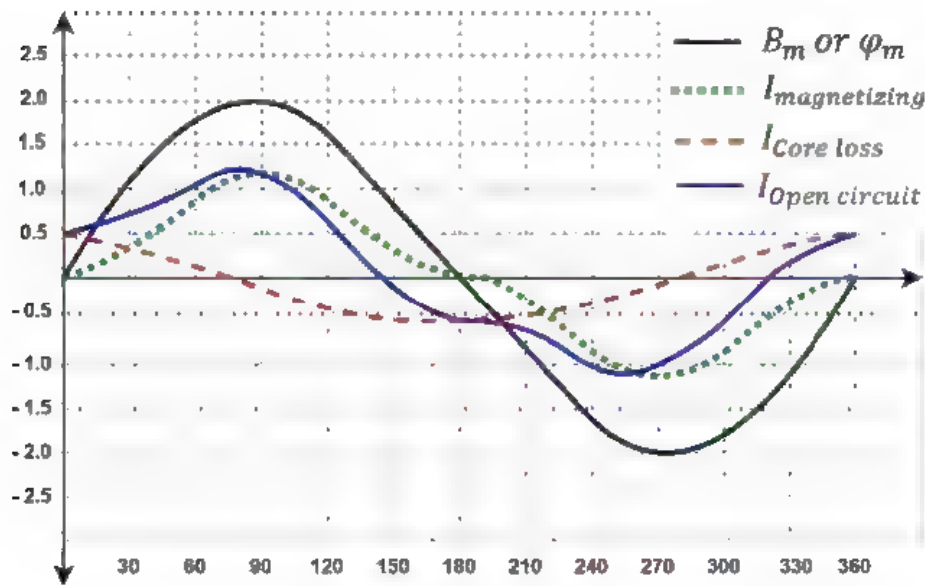
n : الأس وتكون قيمته بين 0.5 و 2.3 حسب نوعية الحديد المُستخدم في القلب ومقدار القيمة العظمى لكثافة الفيض المغناطيسي وعادة ما تكون قيمته محصورة بين (1.5T - 2T) تسلا.

ومنه فإنه في حالة اللاحمل (No-Load) وعند تطبيق فولتية مُترددة على أطراف المحول الواقعي الإنداثية، سينشأ تيار يُعرّف بتيار اللاحمل (I_0 - No-Load/Open circuit current) يتكون من مُركبتين كما هو مُبين بالمعادلة التالية:

$$I_{Open\ circuit} = I_{magnetizing} + I_{Core\ loss}$$

حيث أن:

$$I_{Core\ loss} = I_{Eddy} + I_{Hysteresis}$$



الشكل رقم (1-9)

ملحوظة (1-4): يُمكن ملاحظة أن تيار اللاحمل (No-Load/Open circuit current) I_0 ذو موجة غير جيبيّة كما هو مبين بالشكل (1-9).



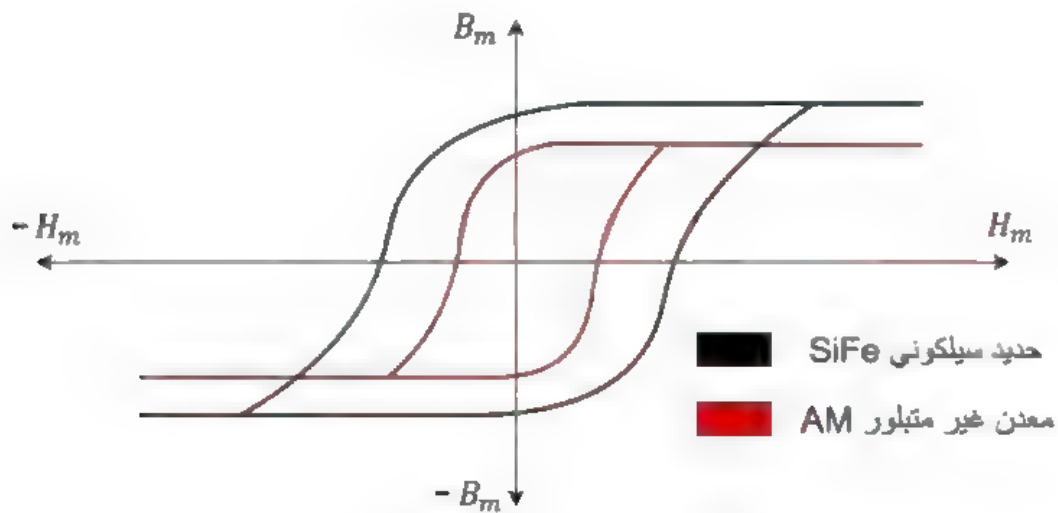


ملحوظة (1-5): تُشكّل نسبة الضياعات الهستيرية إلى ضياعات التيارات الدّوامية ما مقداره (40:60) في الحديد السيليكوني التقليدي، وما مقداره (28:72) للحديد عالي النفاذية (Hi-B).

بالرغم مما تم شرحه من ضياعات في حالة اللاحمل فإن هذه الضياعات تبدو صغيرة نسبياً حيث أن كفاءة المحولات الكهربائية تتراوح بين (95% - 99%) بالمئة وهي نسبة مرتفعة!!!، إلا أن العدد القهول لهذه المحولات في المنظومة الكهربائية جعل لهذه الضياعات قيمة كبيرة لا يُمكن إهمالها وكذلك جعل من تحسين كفاءة المحولات أمر ذو أهمية قصوى، حيث تبلغ قيمة ضياعات القلب (Core losses) ما مقداره (5%) بالمئة من إجمالي ما يتم توليده من قُدرة كهربائية وهو مقدار كبير جداً!!!. وبالعودة لدراسة حول هذا الموضوع أجريت في عام 1988 في بريطانيا وُجِدَ أن هذا النوع من الضياعات (Core losses) لذلك العام أدى لخسائر مادية قُدّرت بـ(110) مليون جنيه استرليني!!!.

لذلك ترنو الكثير من الشركات المُصنّعة للمحولات وخاصة الشركات الكبرى إلى تحسين كفاءة هذه المحولات كشركة (ABB) التي ذهبت إلى إستبدال المادة المُستخدمة في تكوين القلب الحديدي للمحول لمواد ذات ضياعات أقل مثل إستخدام المعدن غير المتبلور (Amorphous Metal - AM) عوضاً عن الحديد السيليكوني (Silicon Steel - SiFe) الذي يُعتبر الأكثر شيوعاً كمادة مُكوّنة للقلب الحديدي لمحولات التوزيع مما يُقلل من قيمة ضياعات القلب بنسبة تصل لـ(70%) كحد أقصى.

الشكل (1-10) يوضح مُنحني (B-H) لمحولين أحدهما ذو قلب من الحديد السيليكون التقليدي والآخر ذو قلب من معدن غير متبلور، حيث يُمكن ملاحظة الاختلاف في الخاصية الهستيرية من معدن لآخر مما يَعني ضياعات أقل.



الشكل رقم (1-10)

• ضياعات الحمل – Load Losses

إن التيار المار بملفات المحول نتيجة وصله بحمل يؤدي إلى ظهور قدرة ضائعة على شكل حرارة، حيث تنقسم هذه القدرة الضائعة إلى ضياعات مادية أو نحاسية (I^2R - Resistive or Copper losses) ناتجة عن قيمة مقاومة الملفات (DC resistance) وضياعات شاردة (Stray losses) كالضياعات الناتجة عن التيارات الدوامية بالملفات (Eddy currents losses) وضياعات التيارات الدوّارة في الموصلات المتوازية (Parallel Conductors Stray losses) والضياعات الشاردة في الأجزاء الهيكلية المكوّنة للمحول (Structural Parts Stray losses)، حيث سيتم شرحها تباعاً كالآتي:

○ ضياعات الملفات – Winding Losses

■ الضياعات المادية أو النحاسية – I^2R - Resistive or Copper Losses

عند مرور تيار في ملفات المحول وتبعاً لقيمة مقاومة الملفات (DC resistance) تظهر ضياعات تسمى الضياعات المادية أو النحاسية (Resistive or Copper losses) و تكون قيمة هذه الضياعات قرابة الـ (85% - 95%) بالمئة من قيمة ضياعات الحمل (Load losses)، كما ويعتمد مقدار هذا النوع من الضياعات على مربع قيمة التيار بالإضافة إلى قيمة مقاومة الملفات وفقاً للمعادلة التالية [AREVA Power transformers expertise Vol.2]:

$$P_r = I^2 R_w \quad (1.12)$$

حيث؛

P_r : قيمة الضياعات المادية أو النحاسية (W).

I : التيار المار بالملفات (A).

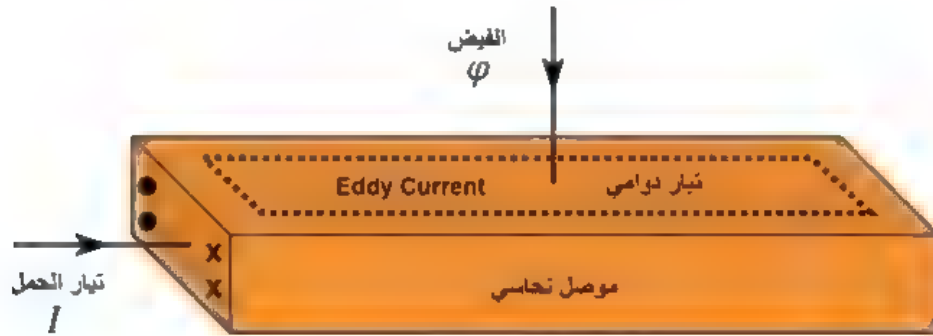
R_w : قيمة مقاومة التيار الثابت للملفات - DC resistance (Ω).

والوسيلة الوحيدة لخفض قيمة هذه الضياعات هي بتقليل مقاومة الملفات ويتم ذلك بجعل الموصلات ذات مقطع عرضي أكبر بقدر مُعتَبَر، وذلك لأن جعل الموصلات ذات مقطع عرضي كبير قد يؤدي لضياعات نحاسية غير مرغوب بها، لذلك يلجأ مُصمّموا المحولات إلى التقليل من طول الملفات بغرض الحصول على مقاومة كهربائية أقل ومنه خفض قيمة الضياعات الناتجة عنها.

■ ضياعات التيارات الدّوامية بالملفات - Winding Eddy Currents Losses

إن الفيض المُتسرب داخل المحول يؤدي إلى ظهور تيارات دّوامية (Eddy currents) داخل ملفات المحول محدثاً ضياعات تُسمى بالـ (Eddy currents losses) أو (Foucault losses) كما هو مُبين بالشكل (1-11)، حيث يُمكن حساب قيمة هذه الضياعات ولكن بشكل مُعقد وذلك يعود

لإحتلاف قيمة هذه الضياعات وفقاً لكثافة الفيض المغناطيسي المُتسرب وزاويته اللذان يعتمدان على موقع هذه الملفات.

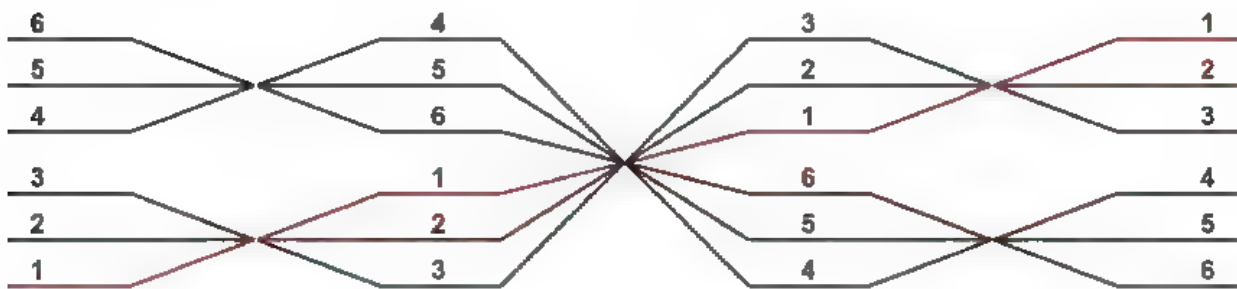


الشكل رقم (1-11)

■ ضياعات التيارات الدوّارة في الموصلات المتوازية - Parallel Conductors Stray Losses

كما تم شرحه سابقاً أن كل جزء من الملفات يتعرض لمقدار مُعيّن من الفيض التسريبي يختلف عن باقي أجزاء الملف وفقاً لموقعه في المحول، وببساطة عليه فإن الموصلات المتوازية المُكوّنة للملفات تتعرض لمقدار مُتغيّر من الفيض التسريبي وهذا يعني مقدار مُتغيّر من فولتية الحث سينشأ في هذه الموصلات، وتبعاً لهذا الإختلاف في الفولتية سينشأ تيار دوّار بين هذه الموصلات المتوازية (Circulating current) من شأنه عمل ضياعات تؤدي لإحماء إضافية لهذه الملفات.

وللحد من قيمة هذه الضياعات يُمكن عمل تبديل بين مواقع هذه الموصلات المتوازية (Transposition) لتتعرض لنفس الفيض التسريبي مما يُحد من مرور هذه التيارات الدوّارة (Circulating currents).



الشكل رقم (1-12)

حيث يُوضح الشكل (1-12) أحد طرق عمل تبديل بين موصلات ملفات المحولات (Transposition) للتعليق على ظاهرة التيارات الدوّارة داخل هذه الموصلات المتوازية

○ ضياعات الخزان – Tank Losses

■ ضياعات شاردة في الأجزاء الهيكلية - Structural Parts Stray Losses

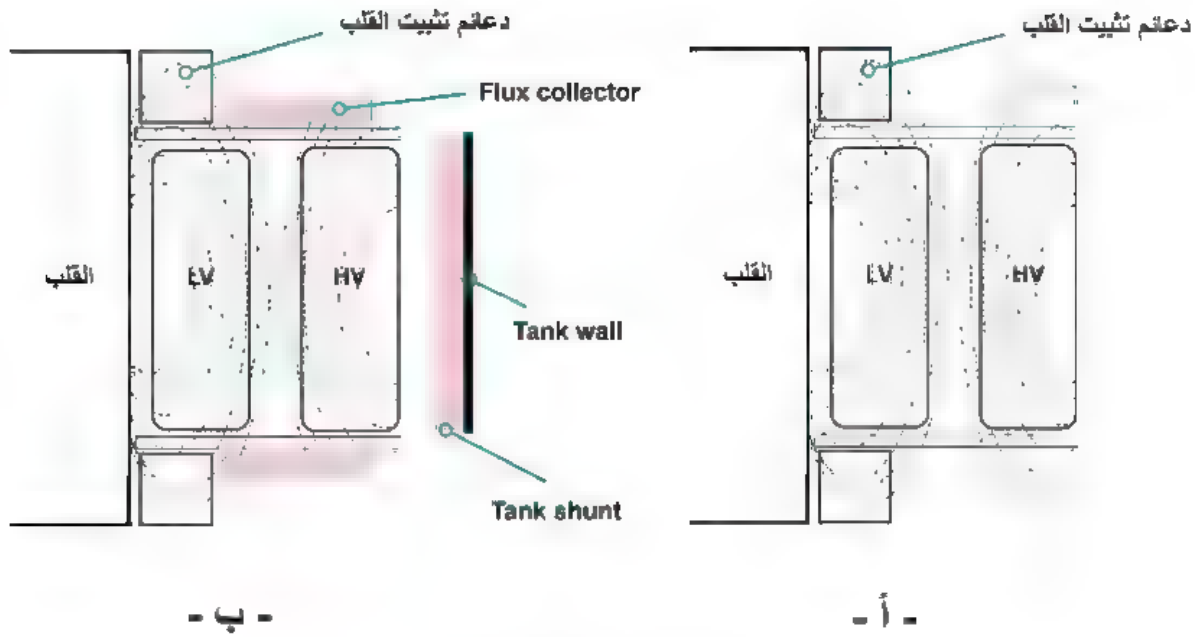
الأجزاء الهيكلية المعدنية المكوّنة للمحول مثل جُدران حزان المحول وغطاؤه و دعائم التثبيت الخاصة بالقلب الحديدي (**Core clamp**) وغيرها من الأجزاء تتعرض للفيض المعطاطيسي المُتسرب وما ينتج عنه من حث كهرومغناطيسي كما هو الحال بملفات المحول، وهذا بدوره يؤدي لنشوء تيارات دَوّامية (**Eddy currents**) في هذه الأجزاء الهيكلية للمحول والتي من شأنها عمل إحماء لهذه الأجزاء والمشاركة في قيمة الضياعات الكُلّية.

■ ضياعات شاردة ناتجة عن الأطراف التي تحمل تيارات عالية - Stary Losses due to High Current Leads

تنشأ هذه الضياعات في الأجزاء الهيكلية القريبة من نقاط التوصيل التي يمر من خلالها تيارات عالية مثل نقطة إلتقاء الملفات بموصلات عوازل الإختراق أو كما تُسمى جُلْب المحولات (**Transformer bushings**)، حيث يكون المجال المغناطيسي ذو قيمة مُرتفعة عند نقاط التوصيل مما يؤدي إلى ظهور تيارات دَوّامية (**Eddy Currents**) في الأجزاء الهيكلية القريبة من هذه النقاط كما ذُكر سابقاً.

لذلك وللتخلص من هذا النوع من الصياعات (**Tank losses**) يتم اللجوء إلى واحدة أو أكثر من هذه الحلول التي تنحصر بـ:

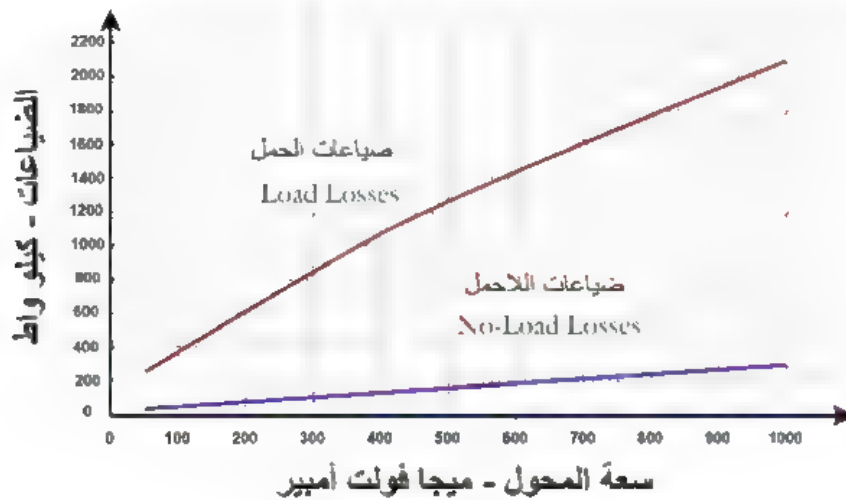
- ✓ إختيار مادة مناسبة لهذه الأجزاء الهيكلية المعدنية وخاصة القريبة من نقاط التوصيل التي يمر من خلالها تيارات مرتفعة مثل إستخدام الحديد غير المغناطيسي (**Non-magnetic steel**) عوضاً عن إستخدام الحديد المغناطيسي (**Magnetic mild steel**).
- ✓ إستخدام تصميم مناسب لهذه الأجزاء الهيكلية، حيث يُؤثر تصميم الأجزاء الهيكلية الداخلية للمحول بشكل كبير في الحد من هذه الضياعات. كما ويُمكن الإستعاضة عن بعض أجزاء دعائم تثبيت القلب الحديدي (**Core clamp**) والتي لا تتعرض لقوى ميكانيكية كبيرة بمواد عازلة بدلاً من المواد المعدنية.
- ✓ التحكم والحد من كمية الفيض المُتسرب في المحول وذلك بإستخدام دروع كهرومغناطيسية واقية (**Electromagnetic shields**) أو ما يُسمى بالـ (**Flux rejector**) و أيضاً يُمكن إستخدام الـ (**Magnetic shunt**) أو ما يُسمى بالـ (**Flux collector**) وذلك للحد من وصول الفيض المتسرب للأجزاء الهيكلية المعدنية المكوّنة للمحول كما هو مبين بالشكل [(1-13) (ب)] ويكون مؤرض بنقطة واحدة مع خزان المحول.



الشكل رقم (1-13)

وهذه الضياعات الشاردة (Stray losses) يصعب إيجاد قيمتها حسابياً، لذلك يتم اللجوء للخطوات التالية لمعرفة قيمتها التقديرية:

- ✓ قياس قيمة الضياعات الكلية أثناء مرور تيار الحمل (Load losses).
- ✓ ثم قياس قيمة مقاومة ملفات المحول (Winding DC resistance) ومنها يمكن حساب قيمة الضياعات المادية أو الحساسة ($I^2 R$) بحيث تكون قيمة هذه الضياعات قرابة (85% - 95%) من قيمة ضياعات الحمل (Load losses).
- ✓ ثم يتم طرح قيمة الضياعات المادية أو الحساسة ($I^2 R$) من قيمة ضياعات الحمل الكلية المُقاسة (Load losses)، وذلك للحصول على قيمة الضياعات الشاردة (Stray losses) وعادة ما تكون قيمة هذه الضياعات الشاردة قرابة (5% - 15%) من قيمة ضياعات الحمل (Load losses).



الشكل رقم (1-14)

يُبين الشكل (1-14) المقدار النموذجي (Typical) لضغوط المحول في حالي الحمل واللاحمل وفقاً لسعة المحول بالميجا فولت أمبير.

وبذلك نكون قد أخطنا قدر الإمكان بالضغوط الخاصة بالمحول الواقعي (Actual transformer) و يمكن رسم الدائرة المكافئة له وفهم الاختلاف بينها وبين نظيرتها للمحول المثالي (Ideal transformer).

4. الدائرة المكافئة للمحول

عند رسم الدائرة المكافئة للمحولات الكهربائية الواقعية (Actual transformer) يجب أخذ ضغوط القدرة سابقة الذكر بعين الاعتبار، حيث يتم تعويض كل نوع من هذه الضغوط بعنصر في الدائرة المكافئة وفقاً للإعتبارات التالية:

✓ الضغوط المادية أو النحاسية – Resistive or Copper Losses

تناسب قيمة هذه الضغوط مع مربع قيمة التيار المار في الملفات ($I^2 R$)، لذلك أسهل الطرق لتمثيل هذه الضغوط التي تؤدي لإحماء مادي لملفات المحول الابتدائية والثانوية هي على شكل مقاومة مادية (R_1 و R_2) على التوالي مع مصدر الفولتية في الدائرة المكافئة.

✓ ضغوط التيارات الدوامية - Eddy Currents Losses والضغوط الهستيرية - Hysteresis Loss

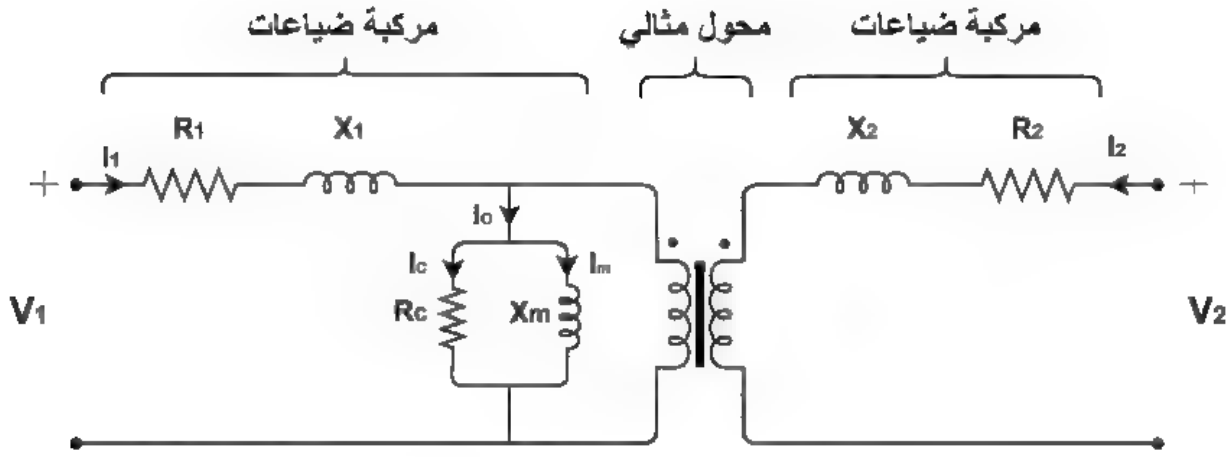
تناسب قيمة هذه التيارات والضغوط الناتجة عنها في القلب الحديدي مع قيمة الفولتية المطبقة، لذلك يتم تمثيل هذه الضغوط على شكل مقاومة مادية (R_C) على التوازي مع مصدر الفولتية في الدائرة المكافئة على الطرف الابتدائي للمحول فقط.

✓ ضغوط الفيض المتسرب - Leakage Flux Losses

يتم تمثيل هذه الضغوط تبعاً لنوعها وعلاقتها بالفولتية والتيار المطبق على شكل مفاعلة حثية (X_1 و X_2 - Reactance) في الدائرة المكافئة للملفات الابتدائية والثانوية للمحول.

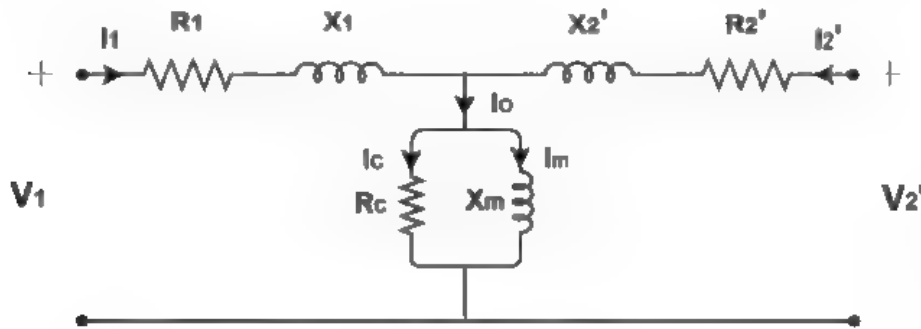
✓ تيار التهيج أو المغنطة للمحول – Excitation or Magnetization Current

تناسب قيمة هذا التيار مع الفولتية المطبقة على أطراف الملف الابتدائي ويكون مُزاح مُتجهياً بمقدار (-90°) عن الفولتية، لذلك يتم تمثيله على شكل مفاعلة حثية (X_m) على التوازي مع المقاومة المادية (R_C) لتصبح الدائرة المكافئة كالتالي:



الشكل رقم (1-15)

ولتبسيط الدائرة المكافئة وإزالة المحول المثالي من الرسم ههناك طريقتين: **الطريقة الأولى** ينسب مركبات ضياعات الدائرة الثانوية إلى الابتدائية وهو ما يُسمى بالإنجليزية (Referred to primary) **والطريقة الثانية** ينسب مركبات ضياعات الدائرة الابتدائية إلى الثانوية (Referred to secondary). وكمثال يُمكن ملاحظة الشكل (1-16) والذي يُوضح عملية نسب مركبات ضياعات الثانوية للدائرة الابتدائية مما يُسهل التعامل مع هذه الدائرة كهربائياً.



الشكل رقم (1-16)

ويكون التبسيط وفقاً للمعادلات التالية:

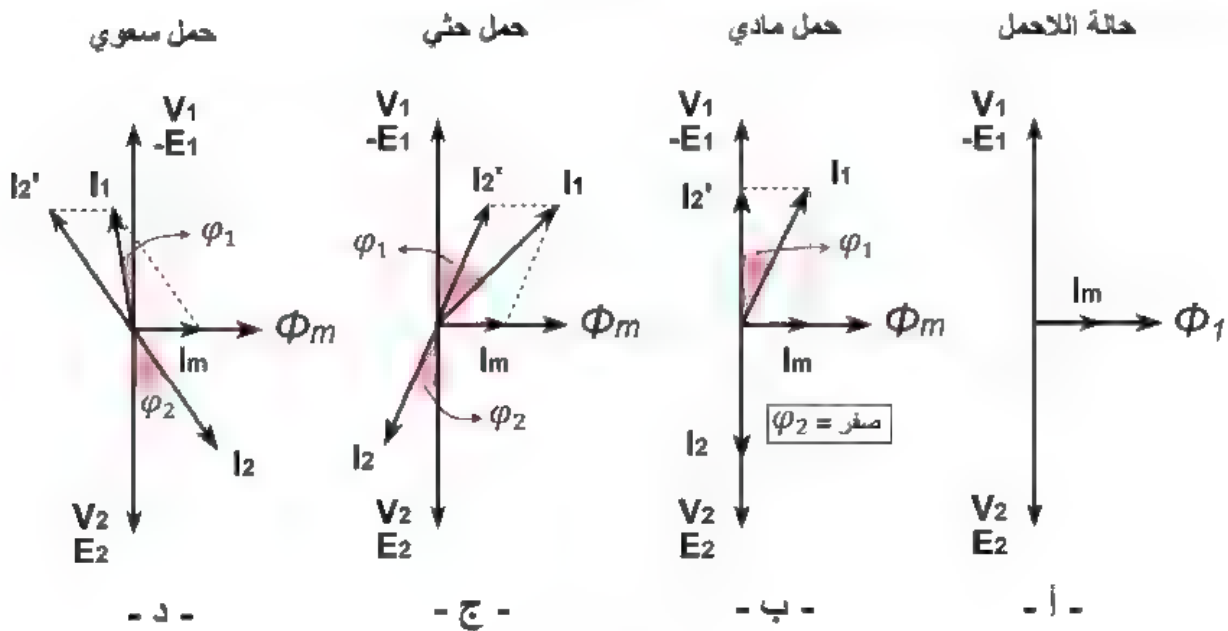
$$\begin{aligned} X_2' &= a^2 X_2 \\ R_2' &= a^2 R_2 \\ V_2' &= a V_2 \\ I_2' &= \frac{I_2}{a} \end{aligned} \quad (1.13)$$

حيث:

$$a = \frac{V_1}{V_2} \quad (1.14)$$

ولزيادة الفهم يُمكن تمثيل فولتيات وتيارات الدائرة المُكافئة وكذلك تأثير الضياعات عليها باستخدام المخططات المُتجهية (Phasor diagrams)

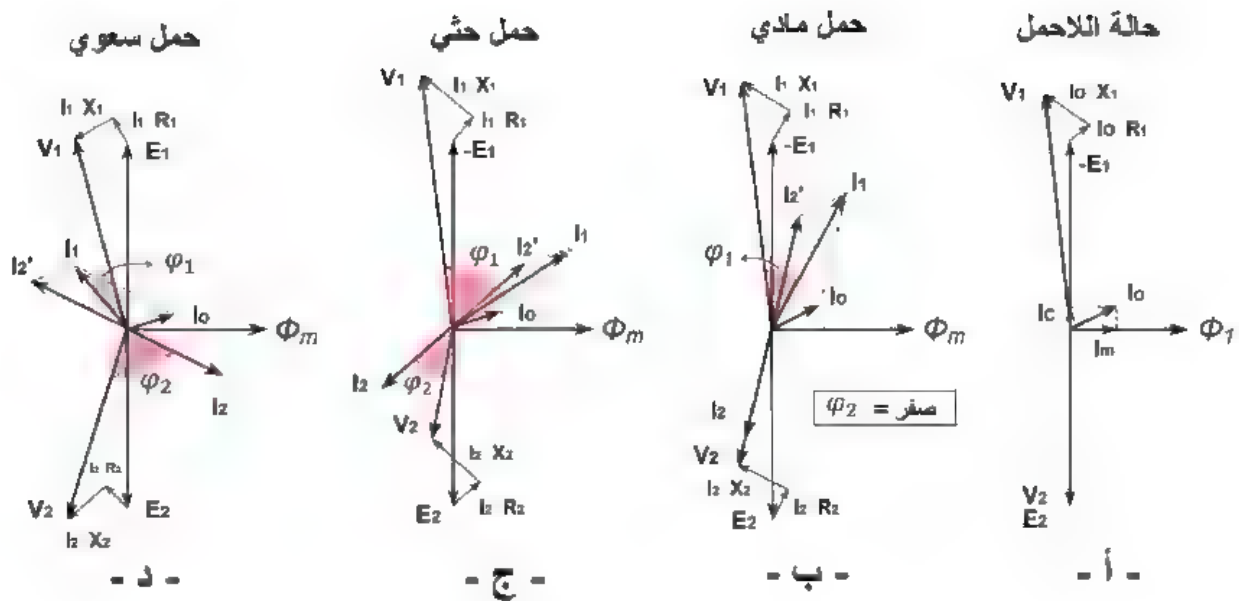
الشكل (1-17) (أ) يُمثل مُخطط مُتجهي (Phasor diagram) لمحول مثالي (Ideal transformer) أحادي الطور نسبة تحويله 1:1 في حالة اللاحمل (No-load)، و الأشكال (1-17) (ب و ج و د) توضح المُخطط المُتجهي (Phasor diagram) لنفس المحول في حالة وصل دائرته الثانوية تارة بحمل مادي (Resistive Load) و تارة بحمل جي (Inductive load) و تارة أخرى بحمل سعوي (Capacitive load) مع إهمال تأثير الضياعات على الدائرة لكونه محول مثالي (Ideal transformer).



الشكل رقم (1-17)

حيث يظهر بالشكل (1-17) إهمال تأثير مقاومة الملفات (R_1 و R_2) والمعاوقة الحثية (X_1 و X_2) الناتجة عن الفيض المُتسرب والتي تؤثر على قيمة الفولتية المُتولدة (Induced voltage)، بالإضافة إلى إهمال تيار القلب (I_C) أو ما يُسمى بتيار ضياعات القلب والناتج عن التيارات الدوامية والخاصية الهستيرية في القلب الحديدي والذي يؤثر على قيمة التيار الابتدائي (I_1)

أما فيما يخص المحولات الواقعية (Actual transformers) فيجب مُراعاة تأثير مُركبات الضياعات على الدائرة الابتدائية والثانوية عند رسم المُخطط المُتجهي (Phasor diagram)، حيث يُمثل الشكل (1-18) المُخطط المُتجهي لمحول واقعي (Actual transformer) أحادي الطور نسبة تحويله 1:1 في حالة اللاحمل (No-Load) وكذلك في حالة وصله بأحمال مختلفة (مادية و جيئية و سعوية)



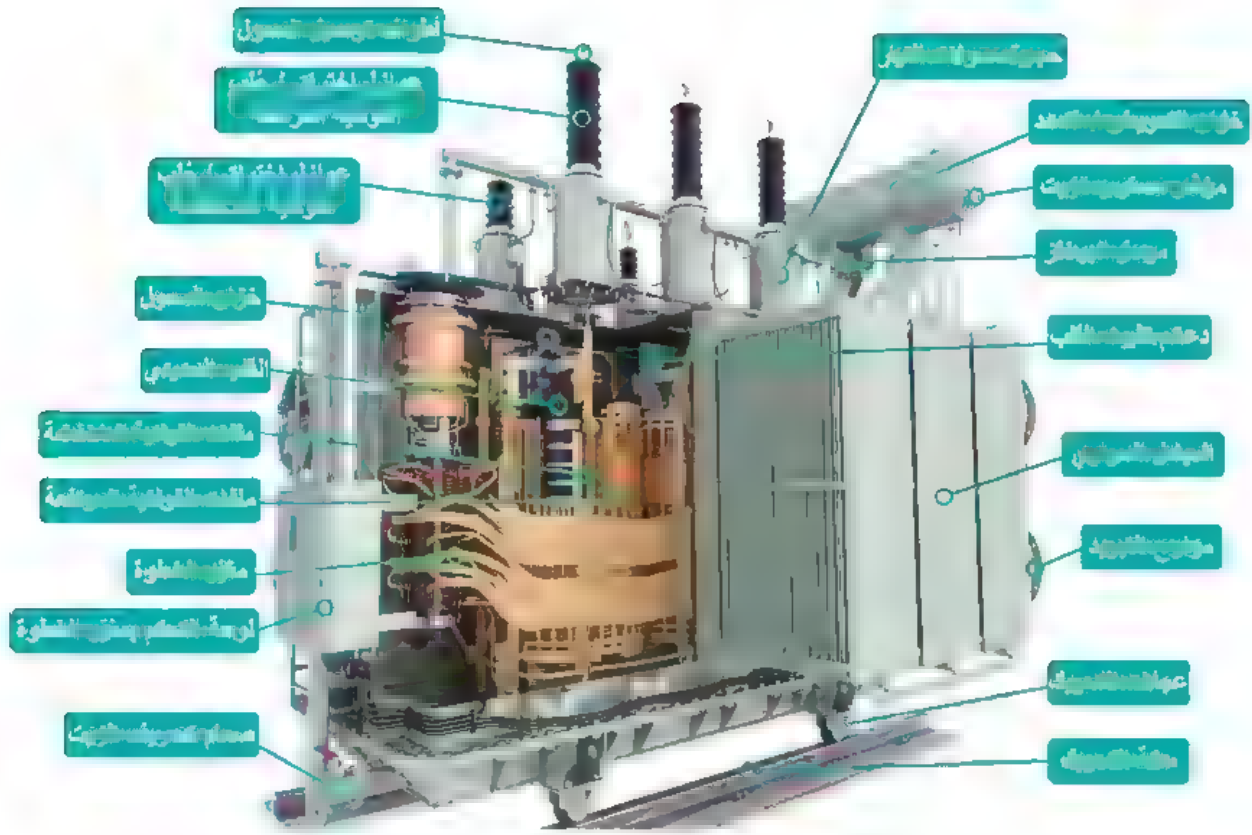
الشكل رقم (1-18)

ومن الشكل (1-18) يُمكن ملاحظة أن مُعامل القدرة (**Power Factor - PF**) الخاص بالمحول يعتمد بشكل كلي على طبيعة الحمل الموصول على أطراف المحول الثانوية، وهذا يُفسّر عدم ذكر أية قيمة لمُعامل القدرة على لوحة البيانات (**Nameplate**) الخاصة بالمحول حيث لا يُمكن التنبؤ بالحمل الذي سيتم وصله بالمحول فيما إذا كان حمل مادي أو حثي أو سعوي.

5. تركيب المحولات الكهربائية

بعد الإنتهاء من شرح مبدأ عمل المحول نظرياً لا بُدّ لنا من شرح مُكونات المحولات الكهربائية المغمورة بالزيت والتي تتمثل بالأجزاء التالية:

5.1 Main Tank	5.1 الخزان الرئيسي
5.2 Active Part	5.2 الجزء الفعال
• Iron Core	• القلب الحديدي
• Windings	• الملفات
• Core Clamp	• دعائم التثبيت
5.3 Tap Changer	5.3 مُغيّر الخطوة
5.4 Insulation System	5.4 نظام العزل
5.5 Transformer Oil	5.5 زيت المحول
5.6 Cooling System	5.6 نظام التبريد
5.7 Bushings	5.7 عوازل الإختراق أو الجُلب
5.8 Accessories	5.8 أجزاء مُساعدة



الشكل رقم (1-19)

5.1 الخزان الرئيسي - Main tank

الخزان الرئيسي للمحول هو ذلك الخزان أو الوعاء المغلق الذي يحوي بداخله القلب الحديدي والملفات وكذلك زيت المحول وعادة ما يكون مستطيل الشكل، حيث تكمن وظيفته بالنقاط التالية:

- ✓ تأمين الحماية الميكانيكية اللازمة لما يحويه بداخله من أجزاء قلب وملفات أو كما تُسمى بالأجزاء الفعالة (Active parts) أثناء عملية النقل أو أثناء التشغيل الطبيعي للمحول.
- ✓ احتواء الزيت الخاص بالمحول تحت الضغط التشغيلي دون حدوث أي تسريب لهذا الزيت.
- ✓ إعطاء المقاومة الكافية أمام فحصي إنخفاض وإرتفاع الضغط (Vacuum and Over pressure tests) في طور التصنيع، حيث يصل الضغط أثناء فحص إنخفاض الضغط (Vacuum test) إلى قرابة الـ (1 mbar) ملي بار أو أقل من ذلك، أما أثناء فحص إرتفاع الضغط (Over pressure test) قد يصل إلى (0.35 bar) بار فوق الضغط التشغيلي.

ويتكون الخزان من صفائح معدنية من الـ (Mild steel) المقوى ذو السمك المناسب، وكما ذكر سابقاً فإن خزان المحول يقع في مرمى الفيض المتسرب من القلب الحديدي مما يعني تكوّن تيارات دوّامية تؤدي لإحماء هذا الخزان، مما دفع مُصمّموا المحولات إلى استخدام مادة الألمنيوم أو الحديد غير المغناطيسي (Non-magnetic steel) في تصنيع الخزان وذلك للحد من تكون هذه التيارات الدوّامية وما ينشأ عنها من ضياعات ونقاط إحماء.

• أنواع الخزانات الرئيسية للمحول

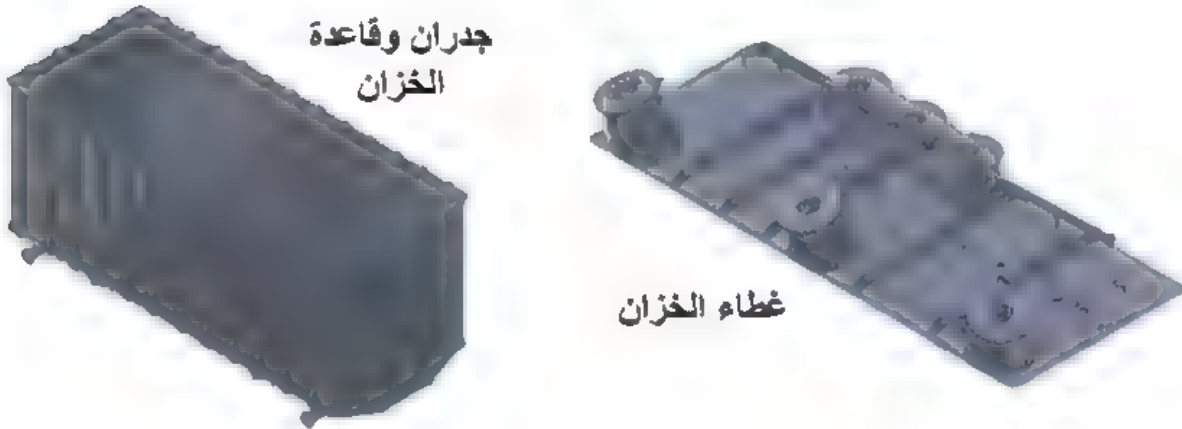
تنقسم الخزانات الرئيسية للمحولات وفقاً لعدة معايير كطريقة التجميع وكذلك نمط التواصل بين وسط العزل الداخلي والمحيط الخارجي للمحول كالآتي:

○ حسب طريقة التجميع

يتكون الخزان عادة من قطعتين رئيسيتين توصلان ببعضهما بواسطة البراغي أو اللحام وتنقسم المحولات من حيث تصميم هاتين القطعتين إلى ثلاثة أقسام رئيسية شائعة الاستخدام:

▪ خزان ذو حافة تثبيت علوية - High flange tank design

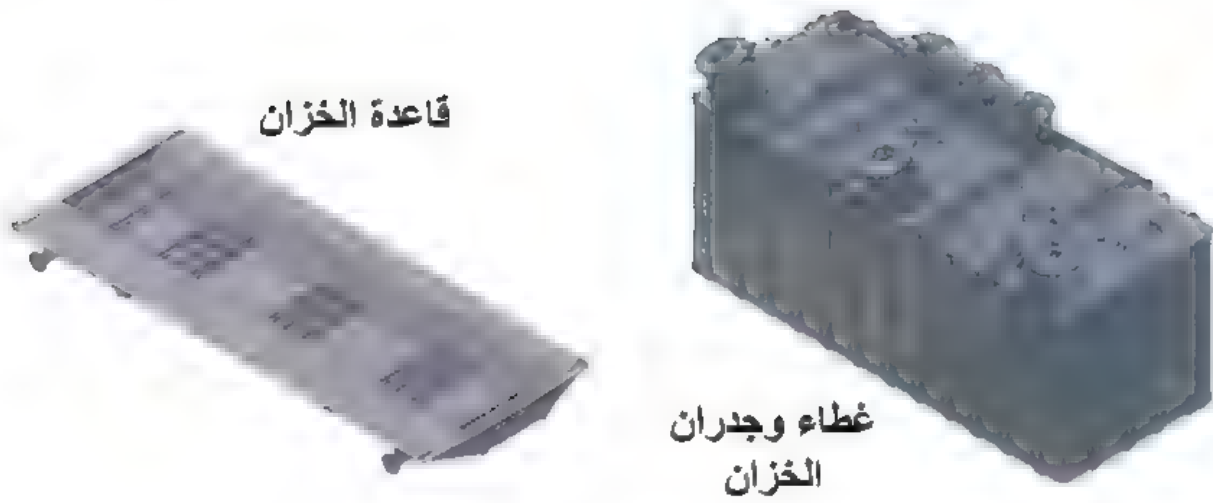
يتم استخدام هذا التصميم عادة للمحولات الكبيرة، حيث يتكون الخزان في هذه الحالة من قطعتين وهما غطاء الخزان العلوي والقطعة الثانية هي قاعدة الخزان والجدران معاً كما هو مبين في الشكل (1-20)، ويتم وصل هاتين القطعتين بواسطة البراغي أو اللحام كما ذكرنا سابقاً. حيث يُعتبر هذا النوع الأكثر شيوعاً



الشكل رقم (1-20)

▪ خزان ذو حافة تثبيت سفلية - Low flange tank design

يتم استخدام هذا التصميم عادة للمحولات الصغيرة، حيث يتكون الخزان في هذه الحالة من قطعتين وهما القاعدة والقطعة الثانية هي جدران وغطاء الخزان العلوي معاً كما هو مبين في الشكل (1-21)، ويتم وصل هاتين القطعتين بواسطة البراغي أو اللحام كما ذكرنا سابقاً.



الشكل رقم (1-21)

■ خزان ذو قلب مُعلّق بالغطاء - Cover hung design:

يتم استخدام هذا التصميم عادةً للمحولات الصغيرة، ويكون تصميم هذا النوع مُطابق للنوع ذو الحافة العلوية (High flange tank) والموضح بالشكل (1-20)، بحيث يكون القلب الحديدي والملفات الحرة الفعال متصل بغطاء الخزان العلوي ويُعتبر هذا النوع الأكثر شيوعاً لمحولات التوزيع.

○ حسب نمط التواصل بين وسط العزل الداخلي والمحيط الخارجي للمحول

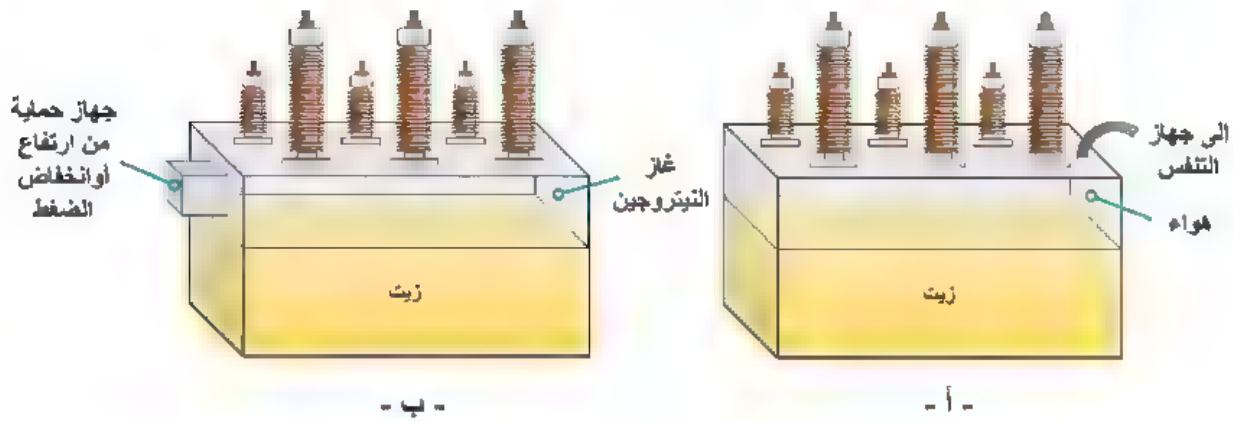
يُمكن تقسيم الخزانات الرئيسية للمحولات تبعاً لنمط التواصل بين وسط العزل الداخلي وهو الزيت في غالب الأحيان والمحيط الخارجي للمحول كالآتي:

■ نظام الخزان المفتوح على الهواء الجوي - Open to Atmosphere or Free Breathing Tank System

لا يحتوي هذا النوع على خزان تعويض أو تمدد (Conservator tank)، بحيث يحتوي الخزان على زيت المحول بالإضافة إلى مساحة أعلى الزيت تكون مملوءة بالهواء المفتوح على الهواء الجوي الخارجي كما هو مبين في الشكل (1-22) (أ)، وتكون حركة الهواء من وإلى الخزان عبر أبواب التنفس في حال الاختلاف الطبيعي لحجم الزيت نتيجة لتغير حرارة هذا الزيت بسبب اختلاف حمل المحول أو درجة حرارة الجو المحيطة، وتكون مقدمة أنبوب التنفس مُتجهة لأسفل منعاً لدخول مياه الأمطار كما ويمكن وضع شبك معدني على مقدمة هذا الأنبوب لمنع دخول الملوثات الصلبة إلى خزان المحول وأيضاً يُمكن إضافة مادة لإمتصاص الرطوبة من الهواء الداخل للمحول كمادة السليكا جل وذلك بوضعها بوعاء عادة ما يكون زجاجي وتثبيتته بمقدمة أبواب التنفس. ويُعتبر هذا التصميم من التصميمات القديمة للخزانات الرئيسية للمحولات ومن سيئاته إمكانية دخول الهواء الرطب والشوائب لخزان المحول مما يؤثر على خصائص الزيت وكذلك يؤدي لتسارع تدهور المادة العازلة الصلبة خاصة ذات الأساس السيليلوزي.

■ نظام الخزان المعزول أو المضغوط – Sealed or Pressurized Tank System

لا يحتوي هذا النوع على خزان تعويض أو تمدد (Conservator tank)، بحيث يكون الخزان معزول كلياً عن البيئة المحيطة ويحتوي على زيت المحول بالإضافة إلى مساحة أعلى الزيت تكون مملوءة بعار النيتروجين الخامل والحاف بضغط أعلى بمقدار بسيط من الضغط الجوي مما يحول دون دخول الرطوبة أو الأكسجين في حال حدوث تسريب كما هو مبين في الشكل (1-22) (ب). ويتم إضافة جهاز للحماية من إرتفاع الضغط أو إنخفاضه داخل المحول يُسمى (Pressure vacuum bleeder) بحيث يكون نطاق الضغط لهذا النوع (10psi - 8psi-).

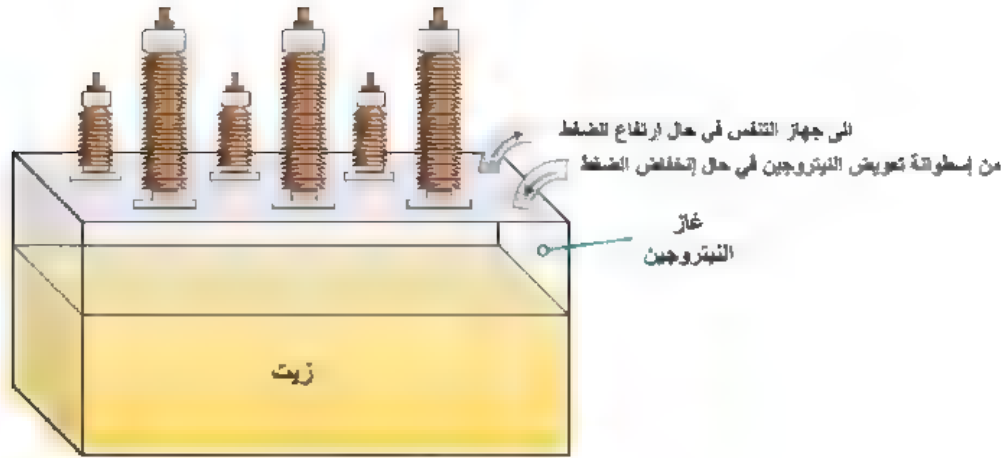


الشكل رقم (1-22)

■ خزان ذو نظام تحكم بضغط الغاز الخامل - Inert-Gas-Pressure System Tank

لا يحتوي هذا النوع على خزان تعويض أو تمدد (Conservator tank)، بحيث يحتوي الخزان على زيت المحول بالإضافة إلى مساحة أعلى الزيت تكون مملوءة بغاز النيتروجين الخامل بضغط أعلى بمقدار بسيط من الضغط الجوي مما يحول دون دخول الرطوبة أو الأكسجين في حال حدوث تسريب كما هو مبين بالشكل (1-23). ويتم إضافة جهاز لمراقبة الضغط داخل المحول وفي حال إنخفاضه عن قيمة معينة يقوم بزيادة الضغط عن طريق حقن غاز النيتروجين، وفي حال إرتفاع الضغط عن قيمة معينة يتم طرد كمية من غاز النيتروجين خارج المحول عبر جهاز التنفس (Breather)، بحيث يكون نطاق الضغط لهذا النوع (7.5psi - 0.5psi).

كما وتجدر الإشارة إلى أنه في حال إستبدال إسطوانة النيتروجين الخاصة بالمحول لا يتم التواصل ما أي مورد لهذا النوع من الغاز بشكل عشوائي، بل يجب التأكد من مواصفات هذا الغاز وذلك لأن النيتروجين المستخدم في المحولات يجب أن يُطابق المواصفات المنصوص عليها في المعايير [ASTM D-1933 Type III] وكما هو موضح في معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE C57.12.00-1993].

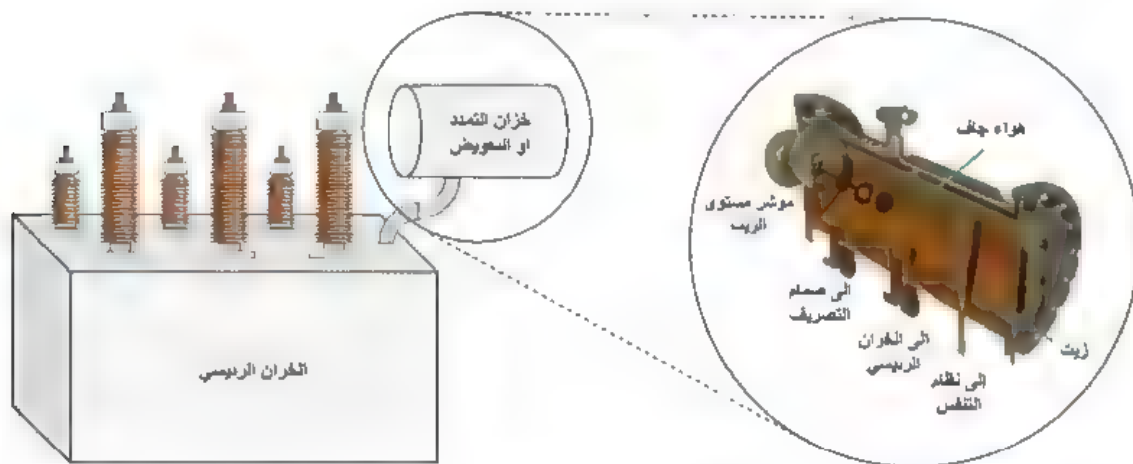


الشكل رقم (1-23)

■ نظام ذو خزان تعويض/تمدد مفتوح على الهواء الجوي المحيط - Open to Atmosphere Conservator Tank

في هذا النظام يكون الخزان الرئيسي للمحول مليء كلياً بالزيت ويكون متصل بخزان تعويض أو تمدد (Conservator tank) يحتوي على زيت المحول بالإضافة إلى حيز مليء بالهواء الجاف كما هو موضح بالشكل (1-24).

عند الإرتفاع الطبيعي لحرارة الزيت نتيجة لزيادة حمل المحول أو إرتفاع درجة حرارة البيئة المحيطة فإن هذا الزيت سوف يزداد حجمه مما يُقلل من حجم الحيز فوق الزيت في خزان التعويض أو التمدد (Conservator) مُؤدياً لطرد جزء من هذا الهواء الحاف إلى البيئة المحيطة بالمحول عبر نظام التنفس أو ما يُسمى بالـ (Breather)، وفي حال إنخفاض درجة حرارة الزيت نتيجة لتقليل حمل المحول أو إنخفاض درجة حرارة البيئة المحيطة فإن هذا الزيت سيتقلص حجمه مما يؤدي لزيادة حجم الحيز فوق الزيت في خزان التعويض أو التمدد (Conservator) مُعطياً مساحة إضافية لدخول الهواء الجاف عبر نظام التنفس مروراً بوعاء صغير يحوي زيت وذلك لتخليص الهواء الداخل من أية حسيمات كالغبار وغيرها من الجسيمات غير المرغوب بها ومن ثم يمر هذا الهواء من خلال وعاء يحوي مادة السيليكا جل والتي تتلخص وظيفتها بتخليص الهواء الداخل لخزان التعويض من الرطوبة.



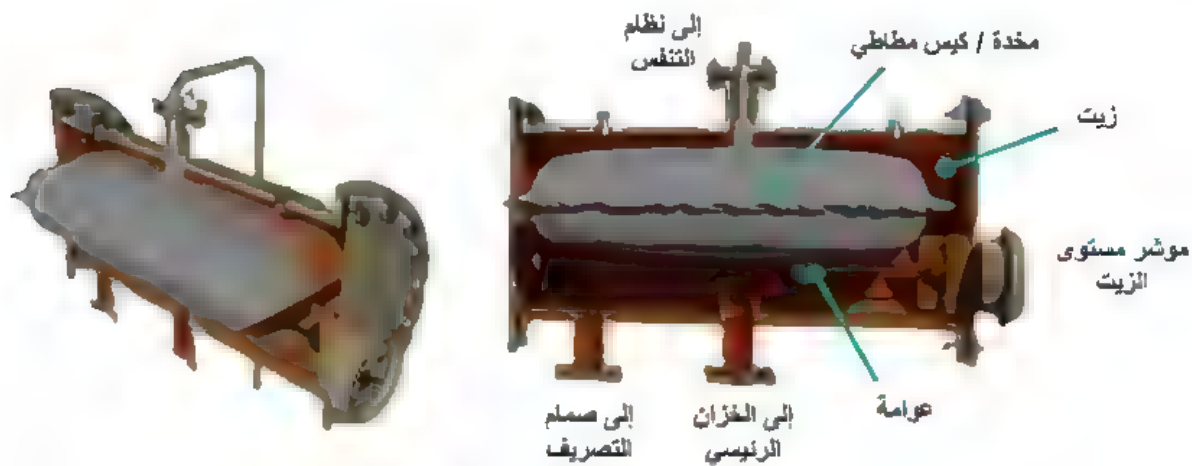
الشكل رقم (1-24)

■ نظام بخزان تعويض ذو كيس هواء مطاطي – Conservator Tank with Air Cell

في هذا النظام يكون الحزان الرئيسي للمحول مملوء كلياً بالزيت ويكون مُتصل بخزان تعويض أو تمديد (Conservator tank) يحتوي على زيت المحول و مخدة - كيس مطاطي - أو كما تُسمى بالـ (Air bag or cell) مملوءة بغاز النيتروجين الخامل، ويكون هذا الخزان معزول عن البيئة المحيطة حيث تمنع هذه المخدة حصول تماس مباشر بين الهواء الخارجي والزيت كما هو موضح بالشكل (1-25)، وعادةً ما يتم استخدام هذا النوع من الخزانات في المحولات ذات الفولتية الأكبر من (115kV) كيلوفولت والسعات الأكبر من (10MVA) ميجا فولت أمبير.

عند الإرتفاع الطبيعي للضغط الداخلي للمحول والناتج عن إرتفاع درجة حرارة الزيت وإزداد حجمه يقوم الزيت بالضغط على مخدة الغاز - الكيس المطاطي - مما يؤدي إلى خروج الغاز منها للبيئة المحيطة عبر نظام التنفس للمحول، وفي حالة الإنخفاض الطبيعي للضغط الداخلي للمحول والناتج عادة عن إنخفاض درجة حرارة الزيت مما يؤدي لتقلص حجم الزيت مما يُعطي مساحة إضافية لمخدة العار ودخول الهواء الجاف عبر نظام التنفس مروراً بوعاء صغير يحوي ريت وذلك لتخليص الهواء الداخل من أية جسيمات كالغبار وغيرها من الحسيمات غير المرغوب بها و من ثم يمر من خلال وعاء يحوي مادة السيليكا جل والتي تتلخص وظيفتها بتخليص الهواء الداخل للمخدة من الرطوبة.

ملحوظة (1-6): تُصنع المخدة (الكيس الهوائي) الخاصة بخزان التمديد من مادة المطاط وكما هو معلوم فإن المطاط من المواد التي قد تتسرب الرطوبة من خلالها، لذلك يجب تخليص الهواء الداخل لهذه المخدة المطاطية من الرطوبة عبر جهاز التنفس (Breather) كما ذكر سابقاً.



الشكل رقم (1-25)

وعلى ذكر الخزان الرئيسي للمحول كان لزاماً أن نذكر الحشية أو الحلقات المطاطية (Gaskets) التي تمنع تسرب زيت المحول في مناطق إلتقاء الأجزاء المعدنية الخاصة بالخزان كغطاء الخزان ونقاط توصيل

أنابيب الحران الرئيسي بحزان التعويض ونقاط إلتقاء المُشع (Radiator) بالحران الرئيسي وكذلك أغطية فتحات الخزان المختلفة وغيرها من الأماكن.

ويتم إختبار نوع الخشبة (Gaskets) آخذين بعين الإعتبار الحرارة التشغيلية للمحول ونوع الريت أو المائع داخل المحول وكذلك الضغط الداخلي للمحول وذلك لتقوم هذه الخشبة (Gasket) بالعمل المُطابق بها و هو منع تسرب الريت لأطول فترة من الزمن مع مراعاة أن تكون المادة المكونة لها ليس لها أي تأثير على الزيت ولا تؤدي لتلوثه، كما ويجب تصميمها بشكل يُتيح سهولة إستبدالها عند تلفها.

كما و تُعد المواد التالية (Cork-nitrile أو Cork-neoprene أو Nitrile أو Viton) أكثر المواد المستخدمة شيوعاً في تصنيع هذه الخشبة (Gasket) حيث تمتلك كل مادة خصائص حرارية مختلفة عن الأخرى، فمنها ما يتم إستخدامه في الحرارة المرتفعة أو المتوسطة ومنها ما يتم أستخدامه للحرارة المنخفضة.

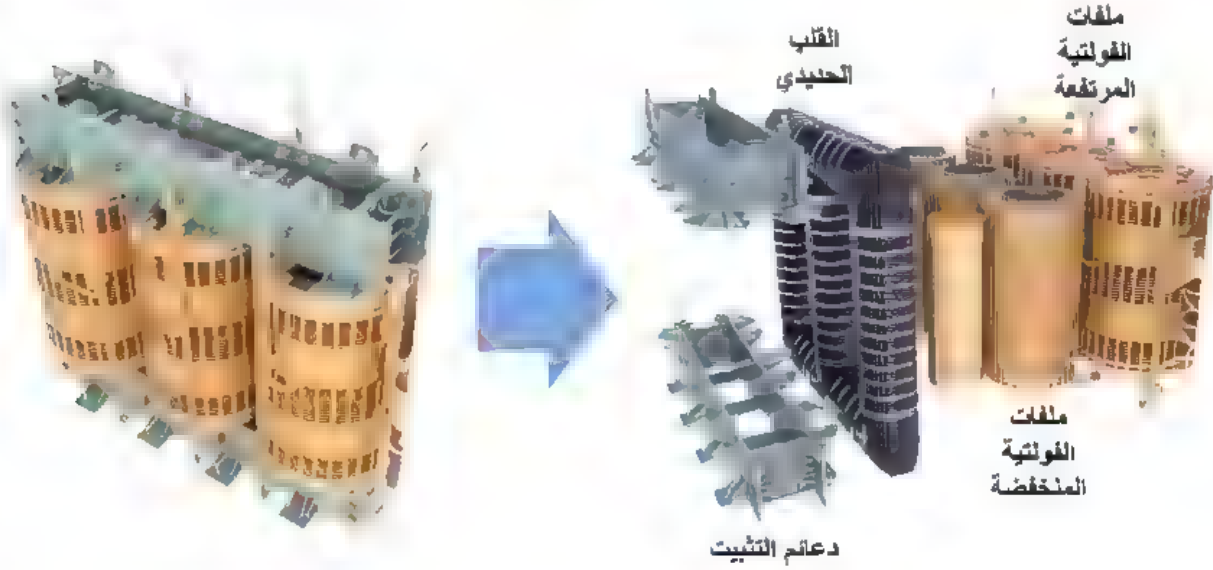


وتجدر الإشارة أيضاً لبعض الملحقات الخاصة بالخزان الرئيسي للمحول مثل العجلات التي تُعتبر إضافة غير إجبارية بحيث يمكن تركيب المحول دون عجلات، بالإضافة إلى وجود فتحات بقاعدة الخزان الرئيسي يمكن تحريك المحول من خلالها في طور التركيب بالموقع (Installation) وتُسمى

(Haulage eyes)، وكذلك يوجد منطقة يتم تصميمها لتحمل قوة ميكانيكية كبيرة و تستخدم لوضع الجك عليها ورفع المحول وتُسمى (Jacking point or plate) كما يظهر بالشكل (1-26).

5.2 الجزء الفعال - Active part

يتكون هذا الحز من القلب الحديدي بالإضافة لملفات الفولتية المرتفعة والمنخفضة وكذلك دعائم التثبيت الخاصة بالقلب الحديدي كما هو مبين في الشكل (1-27).



الشكل رقم (1-27)

• القلب الحديدي - Iron Core

هو ذلك الجزء الذي يحمل الملفات الابتدائية والثانوية للمحول ويُعتبر أيضاً مسار الفيض المغناطيسي داخل المحول و المسؤول عن نقل الفيض المغناطيسي وتركيزه بين ملفات المحول لما له من نفاذية مغناطيسية مرتفعة (High Permeability).



الشكل رقم (1-28)

وعند تصميم القلب الحديدي للمحول وإلى جانب خصائصه الميكانيكية والحرارية تتم مراعاة أن تكون الضياعات الناتجة عن هذا القلب أقل ما يُمكن وذلك بإختيار المادة المناسبة المكوّنة لهذا القلب حيث يجب أن تكون مادة حديدية مغناطيسية (Ferromagnetic material) أي أن نفاذيتها المغناطيسية مرتفعة (High Permeability)، وكذلك يجب أن تكون مادة ناعمة المغنطة (Soft magnetic).

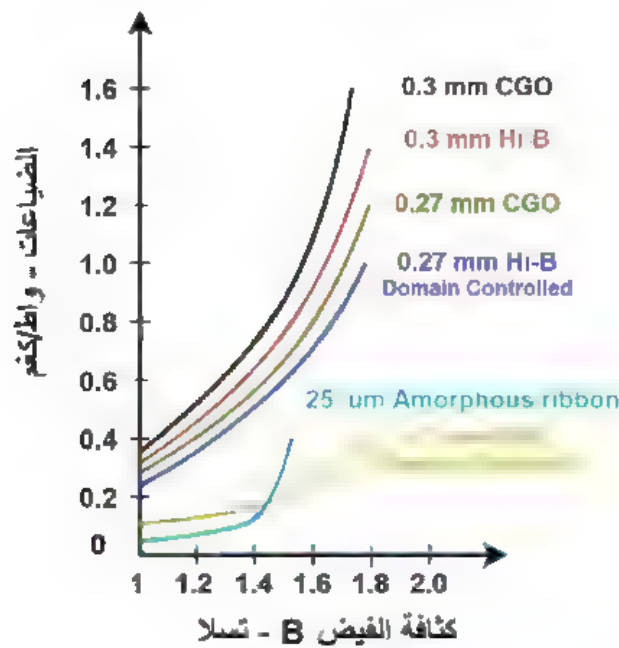
(material) أي عدم قدرتها على الإحتفاظ بمغناطيسية مُتبقيّة كبيرة بعد روال تأثير المجال المغناطيسي الخارجي وبالإضافة إلى إختيار المادة المناسبة للقلب الحديدي يتم جعل القلب يتكون من رقائق (Laminations) لا من قِطع سميكة مُصمّنة من المعدن بحيث تكون هذه الرقائق (Laminations) متراصة فيما بينها ومعزولة عن بعضها البعض.

○ أنواع وفئات المعادن المُكوّنة للقلب الحديدي

تُعتبر الإصدارات المُحسّنة من الحديد السيليكوني موجه الحبيبات والمُدرفل على البارد (Cold rolled grain-oriented silicon steel - CRGO) و أحياناً يُسمى بالحديد الكهربائي (Electrical steel) عوضاً عن الحديد السيليكوني (Silicon steel) أكثر المواد المستخدمة شُيوماً لما له خصائص مغناطيسية جيدة. ويُقصد بتوجيه الحبيبات (Grain-oriented) ترتيبها لتكون بإتجاه واحد وهو إتجاه الذرفلة (Rolling)، حيث أن حبيبات هذا النوع من المعدن تُعطي أفضل خصائص مغناطيسية بالإتجاه التي تكون موجه إليه وتقلل من كمية الضياعات الهستيرية.

أما فيما يخص السيليكون فإن وجوده مع الحديد بنسبة معينة تتراوح من (3% - 5%) بالمئة يجعل الحديد أكثر مقاومة للتقادم (Ageing) ويُساعد في عملية توجيه حبيبات الحديد (Grain orientation) عن طريق جعل الحديد أقل قساوة ويُقلل أيضاً من الضياعات الهستيرية (Hysteresis losses) بالإضافة إلى زيادة مقاومته الكهربائية للحديد (Resistivity) مما يحد من التيارات الدوّامية (Eddy currents) وبالتالي يُقلل من قيمة الضياعات الناتجة عن هذه التيارات. إذ أن الحديد السيليكوني المُستخدم في المحولات والذي يحوي ما نسبته (3%) بالمئة من السيليكون تُصل مقاومته الكهربائية لـ ($50 \mu\Omega cm$) أي أنها إزدادت بمقدار أربعة أضعاف عن نظيرتها للحديد غير السيليكوني أو النقي (Pure Iron).

وبالمقابل فإن وجود السيليكون مع الحديد ييسب أكبر من النِسب الموصى بها من شأنه جعل الحديد هَشَّ وصعب التشكيل بالإضافة لتقليل نفاذيته المغناطيسية (Permeability)، إذ أن نقطة الإشباع



الشكل رقم (1-29)

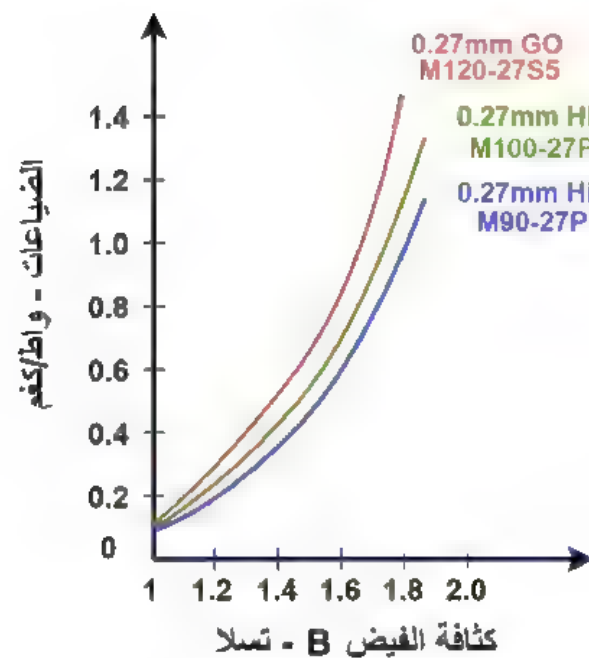
(Saturation point) للحديد السيليكوني تساوي (203 T) تسلا عوضاً عن (215 T) تسلا للحديد غير السيليكوني أو النقي (Pure Iron) أي أنها قلت قُرابة (6%) بالمئة، علماً بأن كثافة الفيض للمحولات عادة ما تكون من (1.3T - 1.8T) تسلا بوضع التشغيل الطبيعي للمحولات.

أحدثت تكنولوجيا إضافة السيليكون للحديد بالنِسب المُعينة المذكورة سابقاً ثورة في تصنيع المادة المُكوّنة للقلب الحديدي، حيث أن قيمة ضياعات القلب (Core Losses) لأول معدن حديد تم إضافة السيليكون له تساوي قُرابة (7 W/kg) واط/كغم فقط عند كثافة فيض مغناطيسي مقداره (1.5 T) تسلا وتردد

مقداره (50 Hz) هيرتز، وهذه التكنولوجيا كانت الأساس لما أتى بعدها من مواد مُكوّنة لهذا القلب إبتداءً من الحديد غير موجه الحبيبات (Non-Oriented) مروراً بالحديد موجه الحبيبات والمُدرفل على الساخن (Hot Rolled Grain-Oriented - HRGO) ذو ضياعات قلب قرابة الـ (2 W/kg) واط/كغم عند كثافة فيض مغناطيسي مقداره (1.5 T) تسلا وتردد مقداره (50 Hz) هيرتز، ومن ثم الحديد موجه الحبيبات والمُدرفل على البارد (Cold Rolled Grain-Oriented - CRGO) ذو ضياعات قلب قرابة الـ (1.5 W/kg) واط/كغم عند كثافة فيض مغناطيسي مقداره (1.5 T) تسلا وتردد مقداره (50 Hz) هيرتز والذي تم إستخدامه بشكل تجاري في نهاية ثلاثينيات القرن العشرين (1939)، وصولاً إلى الحديد عالي النفاذية موجه الحبيبات والمُدرفل على البارد (High Permeability Cold Rolled Grain-oriented - Hi-B) والذي يحتوي ضياعات أقل قرابة الـ (25%) بالمئة من نظيره (CRGO) التقليدي حيث تتراوح ضياعات القلب الخاصة بهذا النوع قرابة الـ (0.85 W/kg) واط/كغم عند كثافة فيض مغناطيسي مقداره (1.7 T) تسلا وتردد مقداره (50 Hz) هيرتز والذي تم إستخدامه مطلع سبعينيات القرن العشرين (1970's) وأصبح هو الأساس في صناعة القلب الحديدي للمحولات في منتصف تسعينيات القرن العشرين (1995) إلى يومنا هذا، وصولاً إلى ما أتى بعد ذلك من معادن كالحديد دقيق التبلور أو الحبيبات (Microcrystalline steel) والمعادن غير المتبلورة (Amorphous steel) والتي من شأنها تحسين كفاءة المحولات وذلك بخفض الضياعات الناتجة عن هذا القلب كما هو مبين بالشكل (1-10) ولكن ما زال إنتشار هذا النوع على نطاق ضيق لتكلفته التصنيعية المرتفعة مقارنة بما سبقه من أنواع.

و بين الشكل (1-29) التفاوت في قيم ضياعات القلب للأبوع المختلفة من المواد المُكوّنة للقلب الحديدي.

أما فيما يخص تركيب القلب الحديدي فإنه يتكون كما ذكر سابقاً من رقائق رقيقة (Laminations) يتراوح



الشكل رقم (1-30)

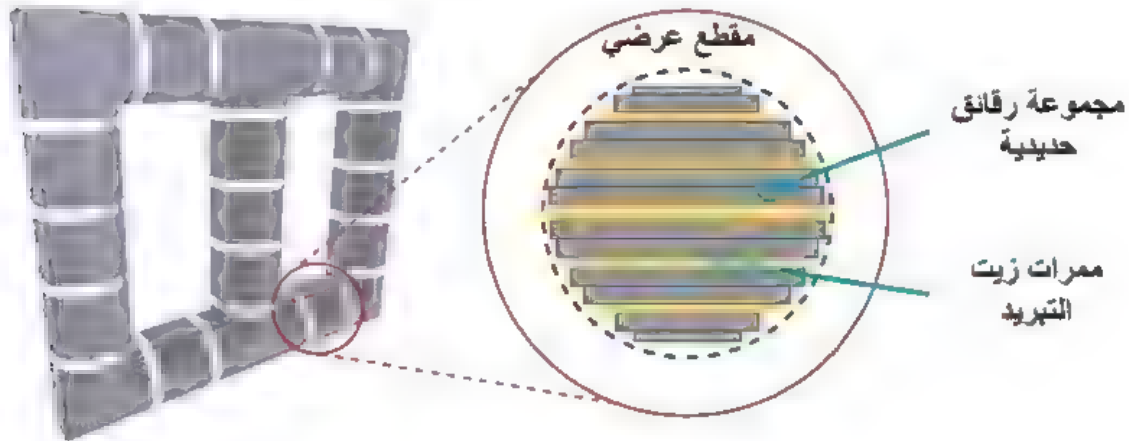
سُمكها (0.23mm - 0.35mm) ملم ويُمكن أن تكون أقل من ذلك في بعض الأحيان، وتكون معزولة عن بعضها البعض بمادة الورنيش العضوية أو غيرها من أنواع طلاء العزل وإلا فلا فائدة من جعل القلب يتكون من هذه الرقائق إن لم تكن معزولة عن بعضها. وهذا العزل بين الرقائق تتراوح قيمة مقاومته الكهربائية عدة أومات (Ohms) بما يكفي للحد من التيارات الدوامية (Eddy currents) في هذه القلب الحديدي.

الشكل (1-30) يوضح الفرق في ضياعات القلب لثلاث فئات (Grades) مختلفة من الحديد موجه الحبيبات (Grain-oriented) ذو السماكة (0.27 mm) ملم عند (50 Hz) هيرتز.

إن الإختيار المناسب للمادة المُكوّنة للقلب وجعلها على شكل رقائق ما هو إلا لرفع كفاءة المحول وذلك بتقليل الضياعات الهستيرية وضياعات التيارات الدوّامية مما يعي ضياعات قلب أقل، حيث تبلغ قيمة الضياعات النوعية القصوى (**Maximum specific losses**) للمحولات المُصنّعة حديثاً بين (- 0.85 1.55 W/kg) واط/كغم عند كثافة فيض مغناطيسي (1.7 T) تسلا و تردد (50 Hz) هيرتز.

○ أنواع القلب الحديدي من حيث التركيب:

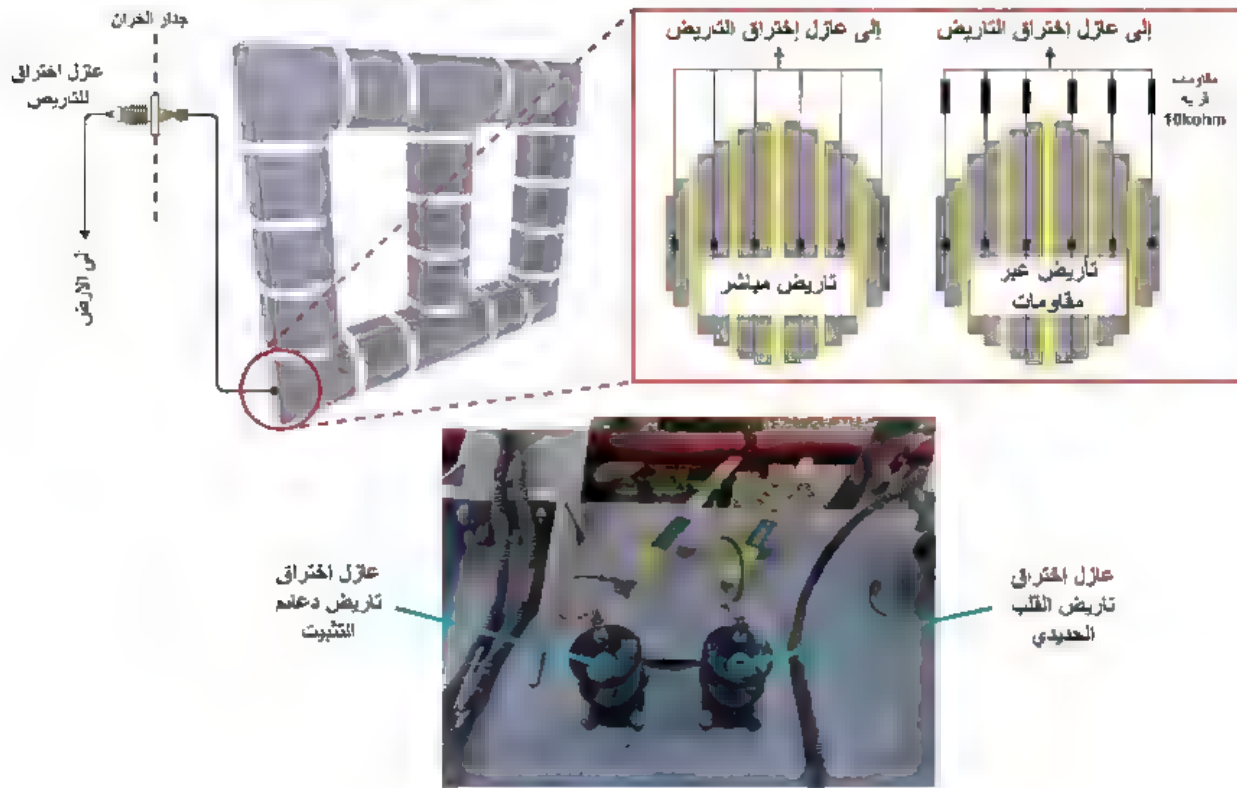
يتم تجميع الرقائق الحديدية (**Laminations Stacking**) المُكوّنة للقلب الحديدي وعزلها بطبقة من الورنيش (**Varnish**) أو غيرها من المواد العسوية وغير العضوية مثل الأغشية الزجاجية (**Glass film**) أو طبقات الفوسفات (**Phosphate layers**) التي يتراوح سُمكها من (0.002mm - 0.003mm) ملم حتى نحصل على الشكل النهائي للقلب الحديدي من حيث السُمك والأبعاد مع مراعاة ربط الرقائق المُكوّنة للقلب ببراعي (**Blots**) أو بأحزمة (**Bonds**) لغايات الدعم الميكانيكي كما يظهر في الشكل (1-28). حالياً تم التخلي عن طريقة ربط الرقائق ببراعي (**Bolts**) لما لها من تكلفة تصيعية بالإضافة إلى زيادة الضياعات في القلب وما قد تسببه من مخاطر إنهاء العزل بين هذه الرقائق.



الشكل رقم (1-31)

عند تجميع الرقائق الحديدية مع بعضها عادة ما يتم ترك فجوة بين مجموعات الصفائح لغايات تأمين ممرات لتبريد القلب بدخول الزيت من خلال هذه الفجوات أو الممرات كما هو مُبين بالشكل (1-31)، ولكن هذه الفجوات ينشأ عنها فولتيات نظراً لظهور مفاعلة سَعوية بين مجموعات الصفائح، وللتخلص من هذه الظاهرة غير المرغوب بها يتم تأريض القلب الحديدي للمحول من نقطة واحدة فقط بموصل نحاسي لتجنب حدوث تيارات دَوّارة (**Circulating currents**) بالإضافة إلى تأمين ممر لتيارات العطل الخاصة بالقلب أو ما يُسمى بالـ (**Electrical fault path**) للرجوع لمصدرها منعاً لظهور الفولتيات المرتفعة المُصاحبة لتيارات العطل مما قد يؤدي المواد العزلة الخاصة بهذا القلب. وتتم عملية تأريض القلب بتمرير موصل التاريز الداخلي المُتصل بالقلب إلى خارج المحول عبر الخزان بواسطة عازل إختراق (**Core grounding bushing**) و من ثم وصلها بالأرض مباشرة، ويكون التأريض إما مباشرة أو عبر

مجموعة مقاومات أو كما تُسمى بالـ (High resistive core grounding) كما هو موضح في الشكل (1-32).



الشكل رقم (1-32)

ويتكون القلب الحديدي من جزئين رئيسيين الأول يُسمى الساق أو العامود (Limb) وهو الجزء العامودي من حزمة الرقائق الحديدية و الجزء الثاني يُسمى الفك أو المِقْرَن (Yoke) وهو عبارة عن الجزء الأفقي من حزمة الرقائق الحديدية كما هو مبين بالشكل (1-33).

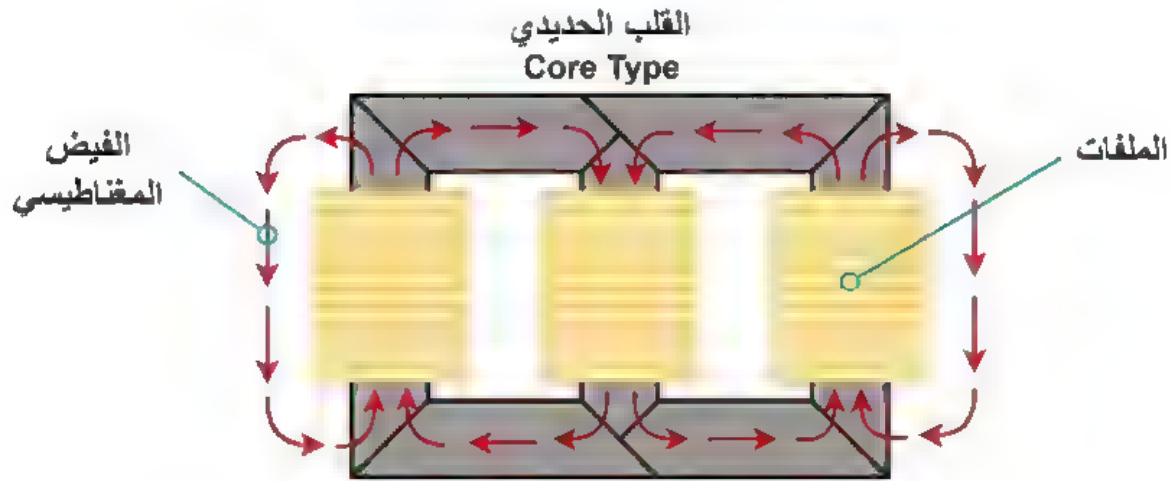


الشكل رقم (1-33)

وتنقسم أنواع القلب الحديدي من حيث عدد الأعمدة (Limbs) للمحولات ثلاثية الطور (Three phase) إلى نوعين رئيسيين وهم:

✓ القلب ثلاثي الأعمدة - Three limbs core

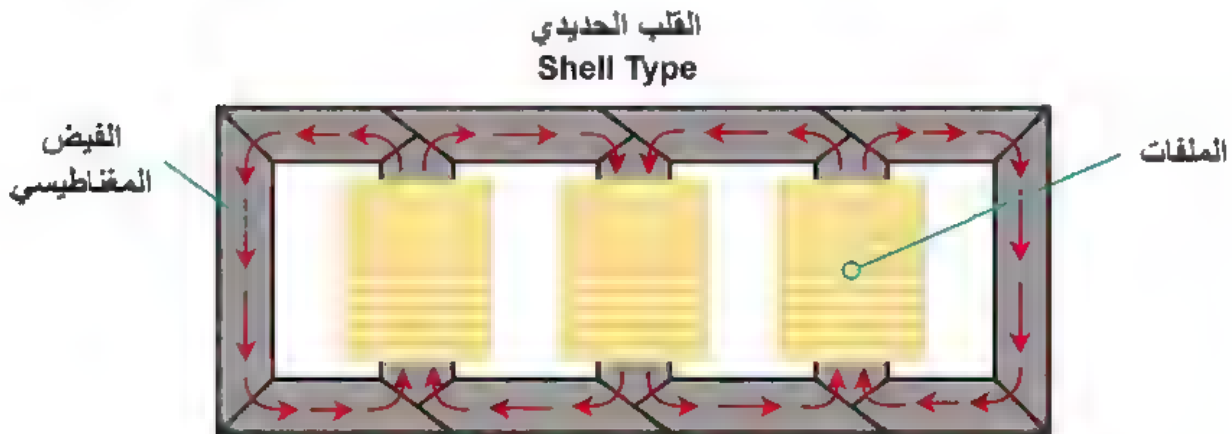
أيضاً يُسمى هذا النوع بالـ (Core type) و يُعد الأكثر شيوعاً للمحولات الصغيرة، ويكون العامود (Limb) و الفك (Yoke) لهما نفس مساحة المقطع العرضي كما هو مبين في الشكل (1-34)، ويمتاز هذا النوع بالحجم الصغير مقارنة بالـ (Shell type) ومن سيئاته أنه ذو مقاومة ميكانيكية أقل من نظيره الـ (Shell type) خاصة في مواجهة القوى الميكانيكية الناتجة عن أعطال القصر أو موجات البرق العابرة.



الشكل رقم (1-34)

✓ القلب خماسي الأعمدة - Five limbs core

أيضاً يُسمى هذا النوع بالـ (Shell type) و يُعد الأكثر شيوعاً للمحولات الأكبر حجماً، ويكون الفك (Yoke) له مساحة مقطع أقل من العامود (Limb) لذلك من مميزات هذا النوع هو أنه ذو وزن قليل مقارنة بنظيره من نوع (Core type) وكذلك ذو قيمة ضياعات أقل ومقاومة ميكانيكية كبيرة ومن سيئاته السعر المرتفع نسبياً مما يجعله غير مُجدي إقتصادية للمحولات الصغيرة.



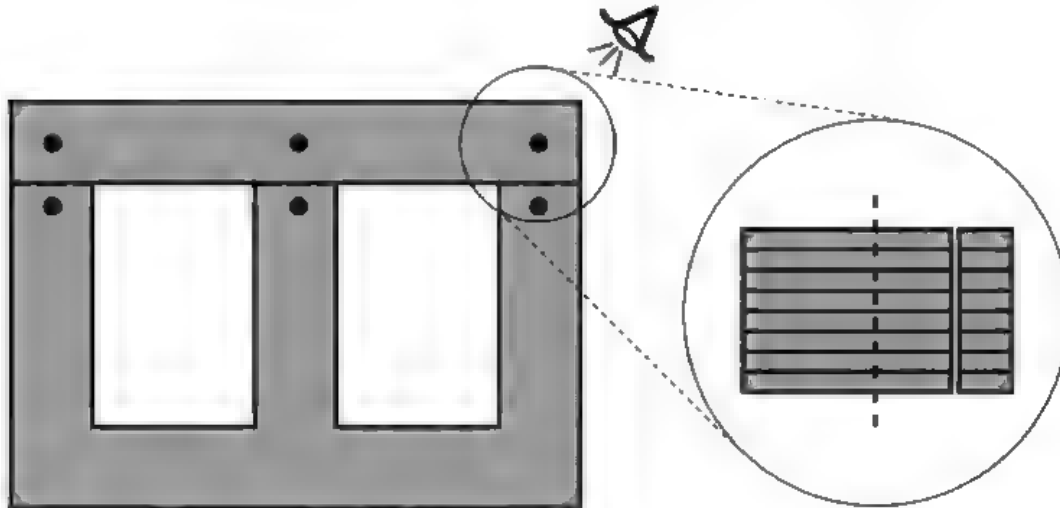
الشكل رقم (1-35)

كما و توجد أنواع أخرى مثل ال(4-Frame core design) وعبره من الأنواع الخاصة التي عادةً ما يتم إستخدامها في المفاعلات الحثية (Reactors).

وعند تصنيع القلب الحديدي (Laminations stacking) للمحول فإنه يتم مراعاة مطقة إلتقاء العامود (Limb) بالفك (Yoke) وذلك لما لهذه المنطقة من أهمية قصوى، حيث يجب أن تكون ذات مُمانعة مغناطيسية قليلة (Low Reluctance) حتى لا تُعيق إنتقال الفيض المغناطيسي بالإضافة إلى تأمين قوى ميكانيكية كافية عند نقطة الإلتقاء أو ما يُسمى بال(Mechanical security) والطُرق الأكثر شيوعاً لعمل الوصلة بين العامود (Limb) و الفك (Yoke) هي كالآتي:

✓ وصلة تناكبية – Butted Joint

تُعد هذه الطريقة الأكثر بساطة والأقل كلفة تصنيعية وعادةً ما يتم إستخدامها في المحولات الصغيرة، ويُعد الحديد غير موجه الحبيبات (Non-Oriented Grain Steel) الأكثر إستخداماً في هذه الطريقة من عمل الوصلات، إلا أن هذه الوصلة ذات قوة ميكانيكية متدنية بالإضافة إلى مُمانعة مغناطيسية مرتفعة نسبياً (High Reluctance) عند نقاط الإلتقاء الوصلات وذلك لصورة مرور الفيض المغناطيسي من خلال الفجوة الهوائية ذات البقاذية المغناطيسية المتدنية (Low Permeability) في منطقة الوصلة الموضحة في الشكل (1-36)، مما يريد من قيمة ضياعات القلب الناتجة عن زيادة تيار المغنطة اللازم للتغلب على هذه المُمانعة.

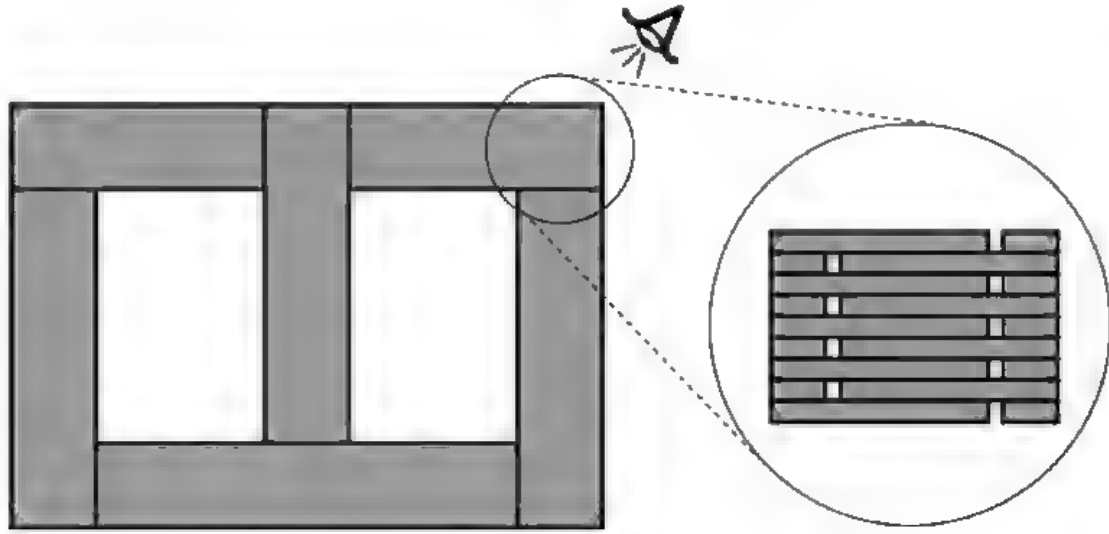


الشكل رقم (1-36)

✓ وصلة تناكبية متداخلة – Interleaved Non-Step Butted Joint

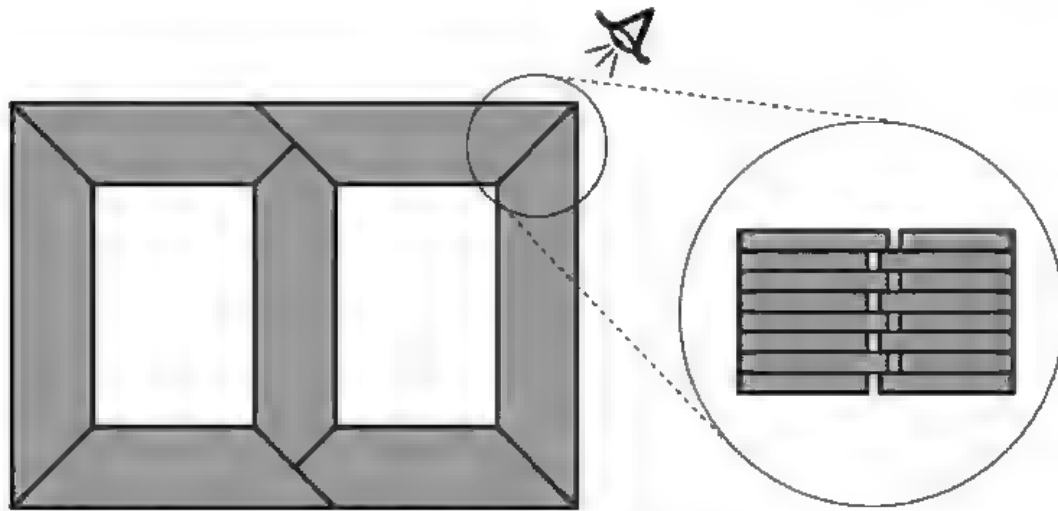
تُعد هذه الطريقة مثل الطريقة السابقة إلا أنه يتم عمل تداحل (Interleaving) بين الرقائق المُكونة للقلب كما هو موضح في الشكل (1-37)، هذه الوصلة ذات مُمانعة المغناطيسية (Reluctance) عند نقاط الإلتقاء - الوصلات - عالية نسبياً ومُعيقة لسريان الفيض داخل القلب وذلك لقلة المسارات أمام الفيض المغناطيسي إما من خلال الفجوة الهوائية أو عبر الرقائق المُلاصقة بيارات محدودة، بحيث يُمكن للفيض المرور بالرقاقة الملاصقة من أعلى أو أسفل الرقاقة الحاملة للفيض فقط، مما يزيد من قيمة ضياعات القلب الناتجة عن زيادة تيار المغنطة

اللازم للتغلب على هذه الممانعة مقارنة مع طرق الوصلات الزاوية الحديثة (ذات الزاوية 45°) أو ما تُسمى بالـ (Mitred Joints).



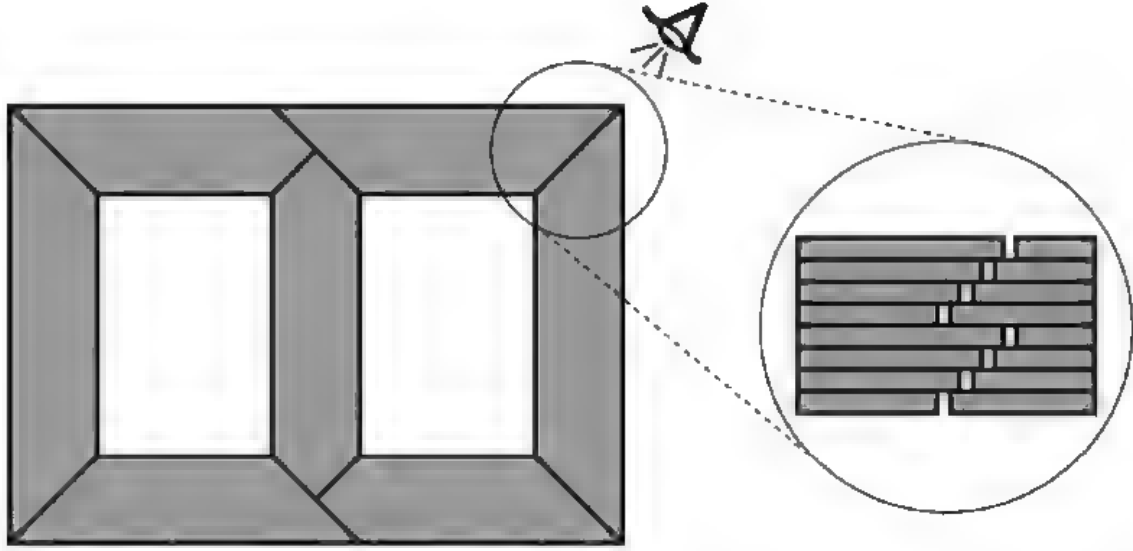
الشكل رقم (1-37)

✓ وصلة زاوية متداخلة ذات خطوة واحدة - **Interleaved Non-Step Mitred Joint**
تُعد من الطرق المنتشرة وذات مُمانعة مغناطيسية (**Reluctance**) أقل من سابقتها عند نقاط الالتقاء - الوصلات - مما يُقلل قيمة ضياعات القلب، ويُعد الحديد موجه الحبيبات (**Oriented grain steel**) الأكثر استخداماً في هذه الطريقة من عمل الوصلات إلا أنها ذات كلفة تصنيعية أعلى من الطرق السابقة. الشكل (1-38) يوضح كيفية تجميع هذا النوع من القلب الحديدي.



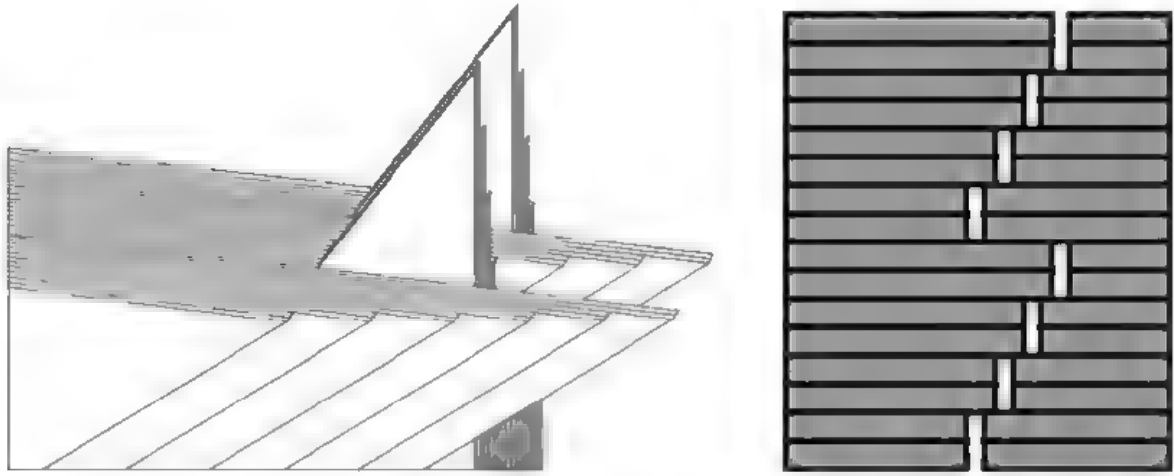
الشكل رقم (1-38)

✓ وصلة زاوية مُتعددة الخطوات - **Step-lap Mitred Joint**
تُعد من الطرق الأكثر إنتشاراً بالمقارنة مع الطريقتين السابقتين، وتكون المُمانعة المغناطيسية (**Reluctance**) قليلة عند نقاط الالتقاء - الوصلات - مما يُقلل من قيمة ضياعات القلب، إلا أنها ذات كلفة تصنيعية عالية. الشكل (1-39) يوضح كيفية تجميع هذا النوع من القلب الحديدي.



الشكل رقم (1-39)

كما أن عدد الرقائق في الخطوة الواحدة يؤثر في مقدار ضياعات القلب، بحيث كلما قل عدد هذه الرقائق أدى لضياعات أقل كما هو الحال في الرقاقة الواحدة لكل خطوة ذات الضياعات الأقل بمقدار قرابة (7%) بالمئة عنها للرقائق الأربعة لكل خطوة. لذلك عادة ما يكون التصميم ذو رقاقة واحدة لكل خطوة كما هو موضح في الشكل (1-39) أو خطوتين كما هو موضح في الشكل (1-40) أو أكثر من ذلك.



الشكل رقم (1-40)

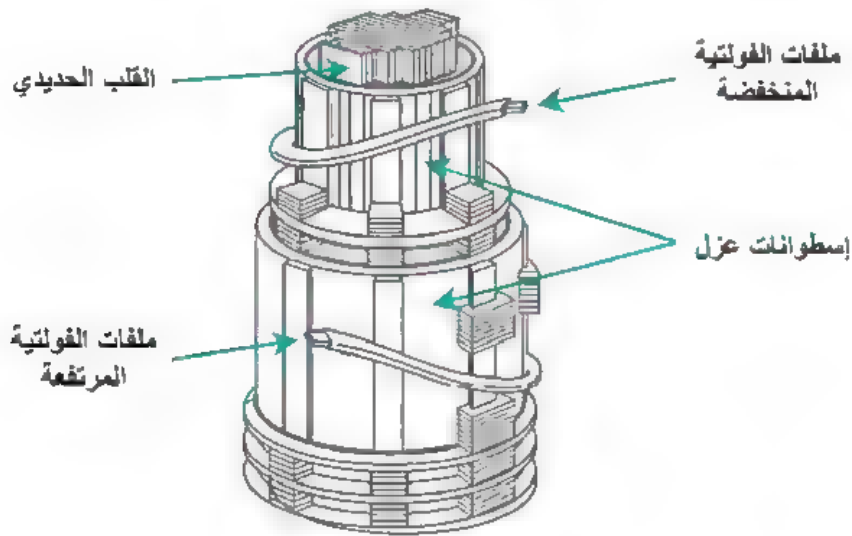
وعند تجميع الصفائح بأي من الطرق سابقة الذكر يجب مراعاة أن تكون الفجوة الهوائية لمنطقة إلتقاء العמוד (Limb) بالفك (Yoke) أقل ما يُمكن، حيث أن ترك فجوة مقدارها (1.5mm) ملم من شأنه زيادة الضياعات بمقدار (1% - 2%) بالمئة عن نظيرتها في حال عدم وجود فجوة. وهناك أيضاً الكثير من طرق عمل الوصلات بين العמוד (Limb) والفك (Yoke) ولكن الطرق سابقة الذكر تُعد الأكثر إنتشاراً.



ملحوظة (1-7): وجب التنويه إلى أن أي كلمة حديد وردت في سياق الشرح فُصِّدَ بها الحديد (Iron) أو الصلب أو كما يُسمى العولاد (Steel) على حد سواء وذلك لتيسير الشرح، أما من الناحية العملية فإنهما يفتقران بالتركيب فالحديد عنصر، أما الصلب أو الفولاذ فهو سبيكة حيث أنها تتكون من حديد و كربون.

• الملفات - Windings

حسب اللجنة الكهروتقنية الدولية (IEC) تم تعريف الملفات (Winding) على أنها مجموعة من اللفات (Turns) المرتبطة ببعضها، و تم تعريف اللعة (Turn) على أنها موصل (Conductor) أو مجموعة من الموصلات المكوّنة على شكل حلقة (Loop) ومما سبق يُمكن معرفة أن الملفات الحاصّة بالمحول ما هي إلى مجموعة من الموصلات والوظيفة الرئيسية المساطة بهذه الملفات هي حمل التيارات داخل المحول بالإضافة إلى تركيز المجال المغناطيسي الناتج عن هذه التيارات.



الشكل رقم (1-41)

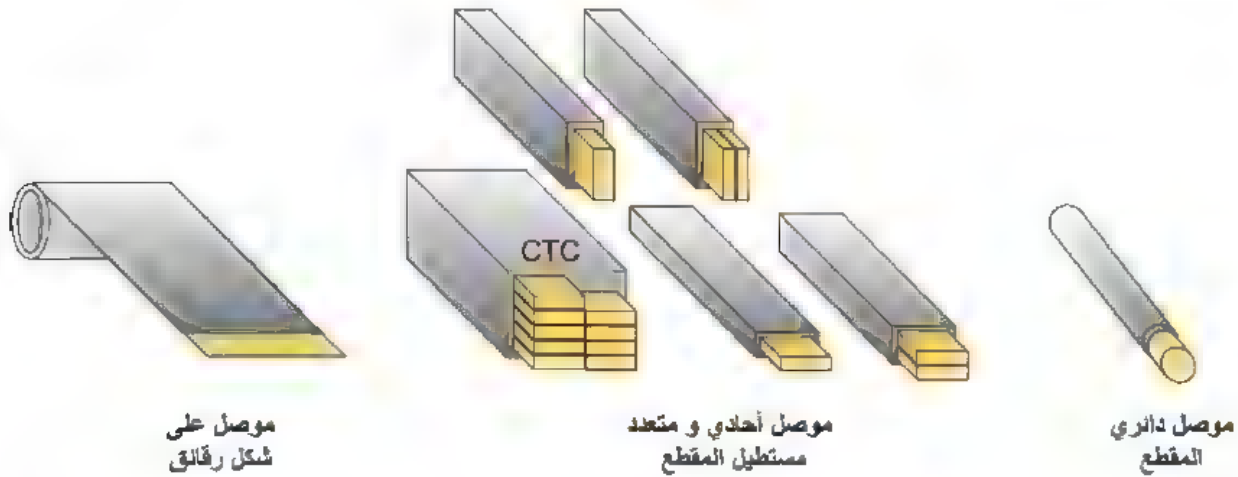
ويعتبر النحاس من أكثر المواد المستخدمة شيوعاً كموصلات داخل المحولات إلى جانب الألمنيوم في بعض الحالات، إذ يتم إختيار الموصل النحاسي آخذين بعين الإعتبار سعة المحول وتياره وحدود الإرتفاع بالحرارة بالإضافة إلى القوى الميكانيكية التي يجب على الملفات تحملها أثناء التشغيل الطبيعي للمحول وأيضاً أثناء حدوث الأعطال.

وكما هو معلوم فإن هذا الموصل النحاسي هو المسار الحامل للتيار داخل المحول، لذلك تم إختيار النحاس على وجه الخصوص لما له من مقاومة كهربائية منخفضة (**Low resistance**) تسمح بمرور التيار بأقل قدر من الخسائر الضائعة على شكل حرارة، بالإضافة إلى ما يمتلكه من خصائص ميكانيكية تساعد على مقاومة القوى الميكانيكية المؤثرة عليه أثناء دورة حياة المحول ضمن الظروف التشغيلية الطبيعية وغير الطبيعية كحدوث أعطال القصر (**Shor circuit faults**) وما ينتج عنها من قوى ميكانيكية كبيرة تؤثر على الملفات. كما ويُفضّل إستخدام النحاس من نوع (**Cu-ETP**) كما تم تعريفه في الـ (**EN 13601**) أو ما يُعادلّه في الخصائص، حيث تصل موصلية هذا النوع من النحاس إلى قرابة الـ (**100% International Annealed Copper Strand - IACS%**) و تعادل مُقاومته قرابة الـ (**0.01724 $\Omega \cdot mm^2 / m$ at**

20°C)، كما ويتم مُعالجته لرفع قوة مقاومته للإجهاد الميكانيكي لتصبح أكثر من (220MPa) ميغا باسكال حيث تُعتبر مادة الـ (Silver-bearing copper - CuAg) إصداراً مُعدّلاً من النحاس المُستخدم في صناعة الملفات (Cu-ETP) سابق الذكر، حيث تُعطي مقاومة ميكانيكية أكبر للنحاس بالإضافة إلى زيادة الموصلية الحرارية والكهربائية كما وأنها مقاومة للتأكسد أيضاً.

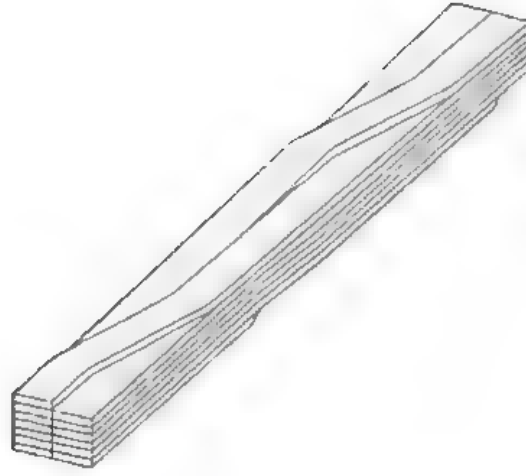
• أنواع الموصلات المُكوّنة للملفات

عالبية المحولات الكهربائية تتكون ملفاتها من موصلات ذات مقطع مستطيل الشكل وذلك لتقليل حجم الملفات و الوصول إلى التوظيف المثالي للمساحة داخل المحول، وفي بعض التصاميم يتم استخدام الموصلات ذات المقطع الدائري أو موصلات على شكل صفائح (Foils) كما هو الحال في المحولات الصغيرة والموضح في الشكل (1-42) وذهب مُصممو المحولات إلى جعل هذه الموصلات ذات مساحة مقطع صغيرة نوعاً ما، بحيث يتراوح سمكها من (1mm - 5.6mm) ملم و عرضها من (2.8mm - 16mm) ملم وذلك لتقليل من ضياعات التيارات الدوامية (Eddy currents) داخل هذه الموصلات نتيجة للفيض المغناطيسي المُتسرب مع مراعاة عدم جعل هذه الموصلات ذات مقطع صغير جداً مما يريد من مقاومتها الكهربائية



الشكل، رقم (1-42)

مما سبق يتضح أن مساحة مقطع الموصل الصغيرة مفيدة للحد من التيارات الدوامية (Eddy currents) داخل هذه الموصلات وما ينتج عنها من ضياعات، ولكن بنفس الوقت كلما صُغرت مساحة مقطع الموصل زادت مقاومته الكهربائية مما دفع مُصممو المحولات إلى جعل الملفات تتكون من مجموعة من الموصلات المتوازية لتحمل التيار الإسمي لهذا المحول والذي بدوره أدى لظهور تيارات دوّارة (Circulating currents) داخل هذه الموصلات المتوازية، وللتغلب على هذه التيارات الدوّارة تم عمل تبديل بين أماكن هذه الموصلات (Transposition) عند نهايات الملفات وذلك لتقليل من الفرق في الفولتية المتولدة في هذه الموصلات نتيجة لتعرضها لمجال مغناطيسي مختلف خاصة في نهايات الملفات كما هو موضح في الشكل (1-43) حيث تُسمى هذه الطريقة بـ (Continuously Transposed Cable - CTC).



الشكل رقم (1-43)

الجدول الآتي يبين آلية اختيار نوع الموصل وفقاً لعدد لفات المحول ومقدار التيار المار في ملفاته.

الجدول رقم (1-1)

عدد اللفات	مستوى التيار		
	كبير	متوسط	قليل
قليل	CTC	CTC	رقائق / مستطيل
متوسط	موصل متعدد / CTC	موصل مستطيل	موصل مستطيل
كبير	موصل متعدد	موصل مستطيل	موصل دائري

كما ويُستخدم الورق ذو الطبيعة السليلوزية (Cellulosic) لغايات عزل هذه الموصلات (Copper strands)، بحيث يتم لف الموصل بعدة طبقات من الورق يتراوح سُمكها من (0.05mm – 0.13mm) ملم.

وعادة ما يتم استخدام نوع واحد من الورق لعزل الموصلات أو يتم خلط أكثر من نوع و أيضاً يمكن استخدام ورق ذو مقاومة حرارية مرتفعة مثل (Nomex) في بعض الحالات.

ونظراً للفولتية ذات المقدار القليل بين الموصلات (Voltage per turn) يمكن عزل هذه الموصلات عن طريق طلاؤها بمادة الورنيش (Enamel coating) عوضاً عن الورق إذ يتراوح سمك هذا الطلاء قرابة (0.1mm) ملم ويمكن زيادة سُمكه إذا لزم الامر.

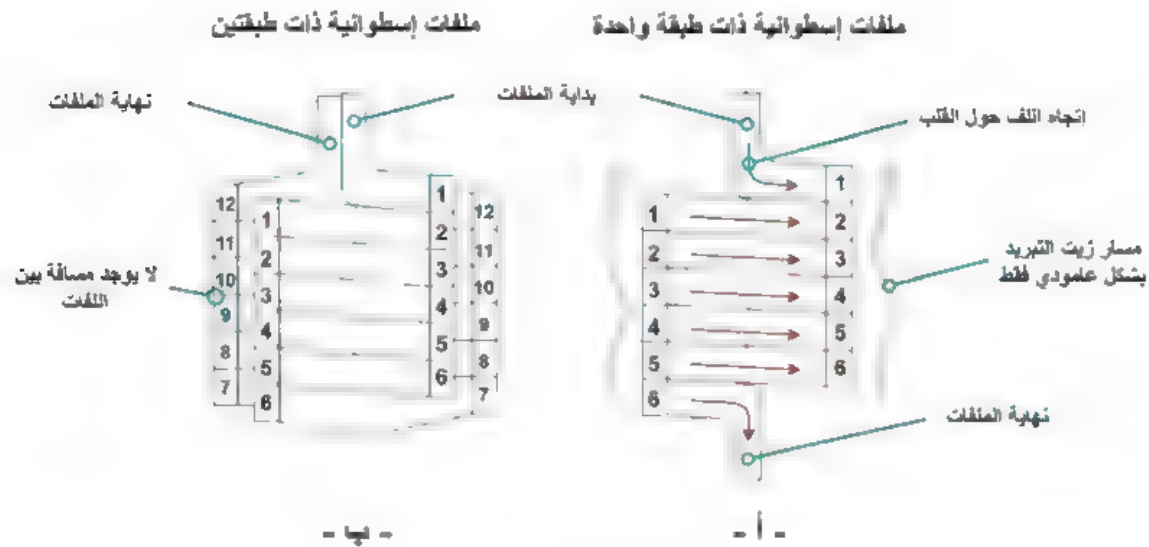
• أنواع الملفات من حيث التركيب

يتم تركيب الملفات حول العامود (Limb) للقلب الحديدي بحيث تكون ملفات الفولتية المنخفضة الأقرب للقلب الحديدي و ملفات الفولتية المرتفعة فوقها وذلك لضمان إنتقال أكبر ما يُمكن من الفيض المغناطيسي بين هذه الملفات بالإضافة إلى تقليل العزل اللازم لعزل ملفات الفولتية المرتفعة عن القلب

الحديدي للمحول كما هو موضح في الشكل (1-41) وهناك عدة أنواع لطرق لف الملفات وتعد الأنواع الأربعة التالية الأكثر شيوعاً:

■ الملفات الطباقية أو الإسطوانية - Layer/Barrel winding

يُعتبر هذا النوع من أبسط أنواع طرق اللف بحيث يتم لف الموصلات فوق إسطوانة بشكل متلاصق ويتم ترك مساحة بين طبقات اللف (Layers) في حال كانت الملفات تتكون من أكثر من طبقة لتأمين ممر تبريد عامودي بين الطبقات كما هو موضح في الشكل (1-44)، وعادة ما يتم استخدام هذه الطريقة باللف للمحولات ذات التيار المنخفض وذلك لإنخفاض كفاءة التبريد العامودي فقط، حيث لا يوجد ممرات تبريد أفقية بين الملفات.

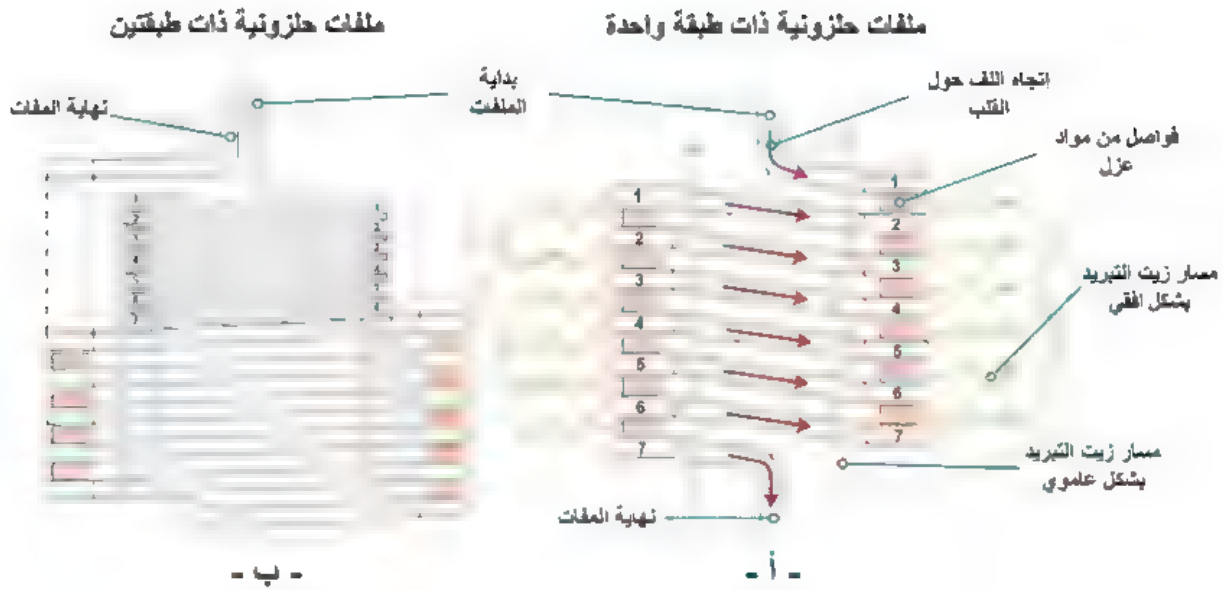


الشكل رقم (1-44)

■ الملفات الحلزونية - Helical winding

يتم لف الموصلات بنفس الطريقة السابقة (Layer winding) مع مراعاة ترك مساحة بين الملفات بوضع عوارل من الألواح المضغوطة (Pressboard) على شكل فواصل (Spacers) ومساحة بين طبقات اللف (Layers) في حال كانت الملفات تتكون من أكثر من طبقة وذلك لتأمين ممر تبريد أفقي بين الموصلات أو الملفات وممر آخر عامودي بين طبقات اللف كما هو موضح في الشكل (1-45)، وعادة ما يتم استخدام هذه الطريقة باللف للمحولات ذات التيار المرتفع أو بمعنى آخر ذات الفولتيات المنخفضة.

كما وتُجدر الإشارة إلى أنه في هذا النوع من طرق اللف عادة ما يتم استخدام الموصلات من النوع (CTC) بشكل منفرد أو متعدد للحصول على مساحة مقطع الموصل المُراد.

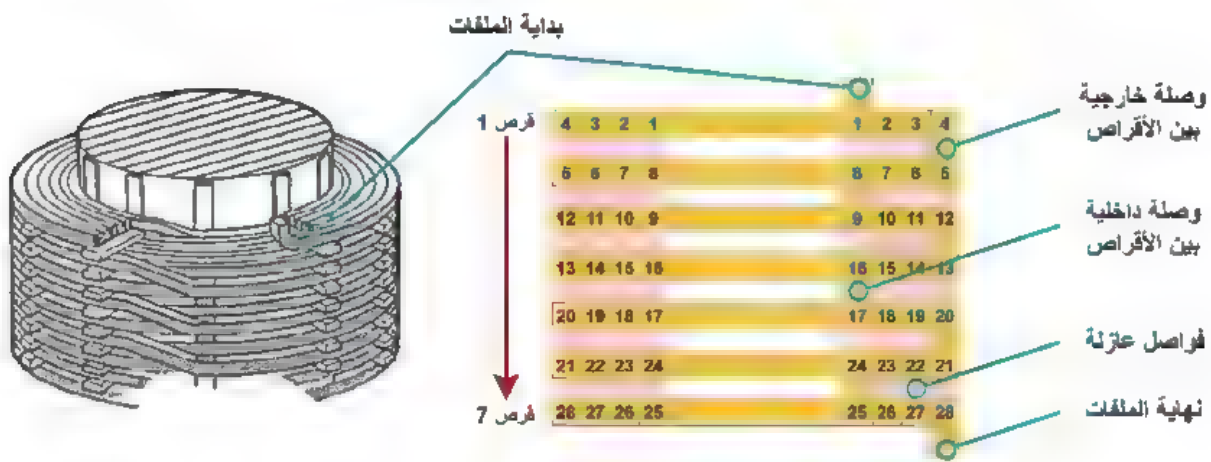


الشكل رقم (1-45)

ملفات قُرصية - Disc winding

في هذه الطريقة يتم لف الموصلات على شكل أقراص دائرية بحيث يتكون القُرص الواحد من عدة لفات، وتتصل هذه الأقراص فيما بينها بوصلة أو ما يُسمى (Disc to disc connection) كما هو موضح في الشكل (1-46)، وعادة ما يتم استخدام هذه الطريقة باللف للمحولات ذات الفولتية التي تزيد عن (25kV) كيلوفولت.

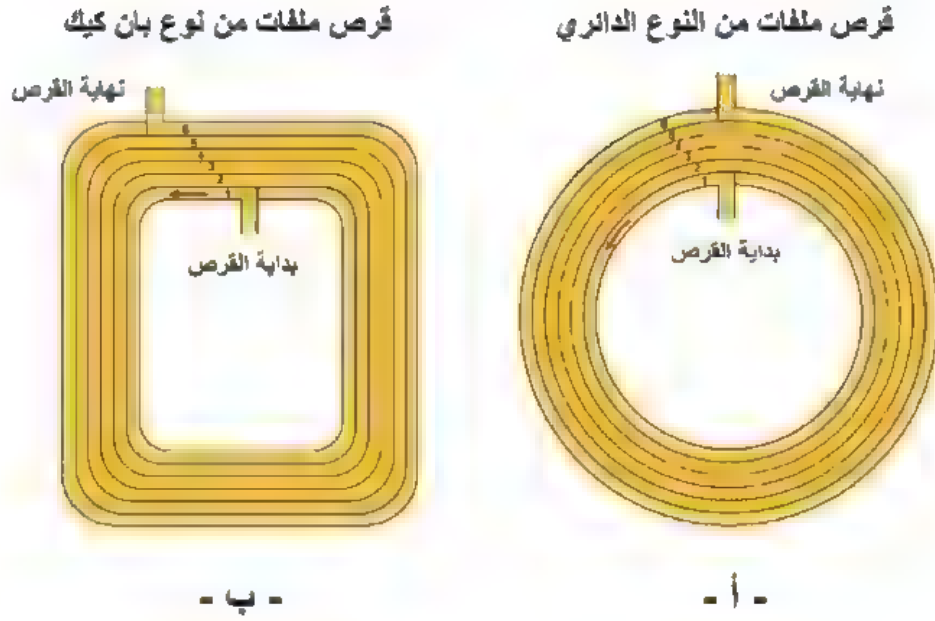
ملفات قرصية



الشكل رقم (1-46)

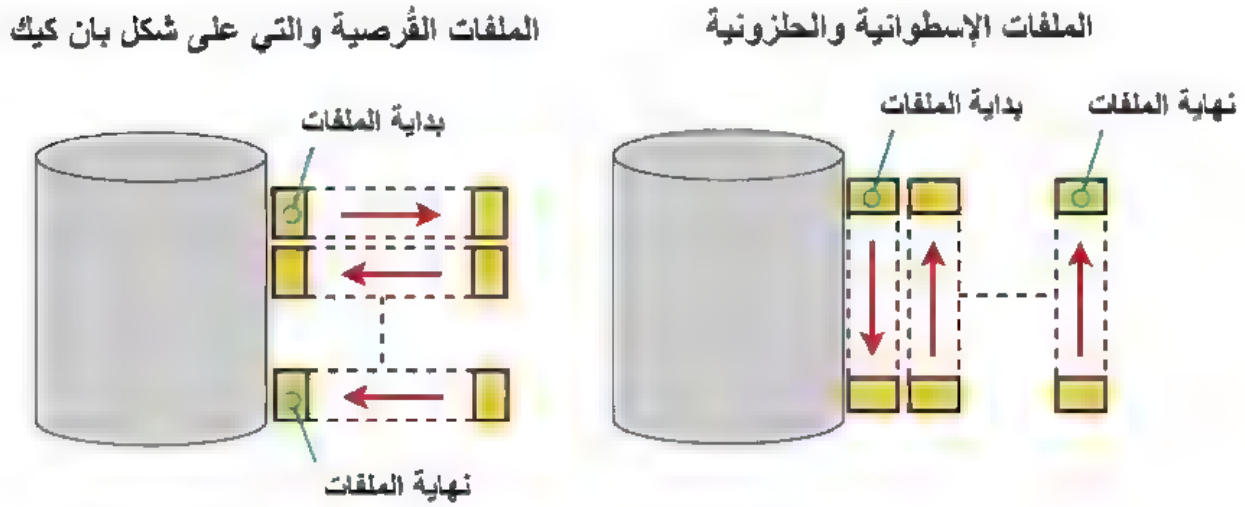
ملفات على شكل بان كيك - Ban-cake winding

تُعد هذه الطريقة نوع من أنواع الملفات القُرصية ولكن الاختلاف أنه يتم لعها على شكل أقراص مستطيلة الشكل لا دائرية الشكل كما هو الحال في الملفات القُرصية سابقة الذكر، وكما هو موضح في الشكل (1-47)، وعادة ما يتم استخدام هذه الطريقة باللف للمحولات ذات القلب الحديدي من نوع خماسي الأعمدة (5 limbs core) أو ما يُسمى بالـ (Shell type core).



الشكل رقم (1-47)

ومنه يُمكن ملاحظة أن إتجاه اللف للطرق الأربعة سابقة الذكر يكون بالإتجاه الموضح بالشكل (1-48).



الشكل رقم (1-48)

• دعائم تثبيت القلب - Core Clamp

تكون هذه الدعائم المعدنية على شكل مشابك وظيفتها الأساسية تطبيق قوى شد ثابتة على القلب الحديدي و الملفات وذلك لحماية هذه الأجزاء من القوى المؤثرة عليها أثناء عمل المحول في الظروف التشغيلية الطبيعية أو أثناء تعرض المحول لأعطال القصر (Short circuit faults) وما ينتج عنها من قوى ميكانيكية تؤثر على الملفات والقلب الحديدي.



حيث تكون هذه الدعائم على شكل إطار (Frame) وتقوم بشد الفك (Yoke) العلوي والسفلي والملفات كما هو مبين في الشكل (1-49)، ويكون هاذين الإطارين العلوي والسفلي مرتبطان ببعضهما بأعمدة وظيفتها تطبيق قوى شد على أعمدة المحول (Limbs). وكذلك هنالك وظيفة ثانوية لهذه الدعائم وهي توجيه الزيت داخل الملفات لزيادة كفاءة التبريد في حال استخدام تصميم تدفق الزيت الموجه داخل الملفات (Directed Oil Flow - DOF) كما سيتم شرحه في نظام التبريد للمحول لاحقاً.

الشكل رقم (1-49)

كما وتجدر الإشارة إلى ضرورة تأريض هذه الدعائم المعدنية من نقطة وحدة فقط بموصل نحاسي لتجنب حدوث تيارات دوارة، وذلك بوصل هذه الدعائم بموصل وتمرير هذا الموصل إلى خارج المحول عبر الخزان بواسطة عازل إختراق (Core Clamp Grounding Bushing) و من ثم وصلها بالأرض مباشرة (Solidly grounding) كما هو موضح في الشكل (1-32).

5.3 مُغَيِّر الخطوة - Tap Changer

ويُسمى أيضاً مُعَيِّر الفولتية ويُستخدم لتنظيم فولتية مخرج المحول وذلك بالتحكم بعدد لفات ملفات المحول ذات الفولتية المرتفعة أو المنخفضة أو كلاهما إما بالزيادة أو النقصان، بحيث يقوم بالمحافظة على مستوى فولتية مخرج ثابتة في حال إحتلافها نتيجة لتغير مقدار فولتية المدخل أو نتيجة لمرور تيار الحمل وما ينتج عنه من ضياعات داخل المحول تؤدي لحدوث إنخفاض في مقدار فولتية المخرج مثل الضياعات النحاسية الناتجة عن مقاومة ملفات المحول أو الضياعات غير الفعالة الناتجة عن محاثّة ملفات المحول (الفيض المُتسرب) وهذا الهبوط في الفولتية يُسمى بالـ (Regulation). كما وتجدر الإشارة إلى أن مقدار الهبوط في فولتية المخرج الناتج عن الضياعات النحاسية (Resistive voltage drop) أقل نوعاً ما من مقدار الهبوط في فولتية المخرج الناتج عن الضياعات غير الفعالة (Reactive voltage drop).



ملحوظة (1-8): يوجد وطبيعة أخرى لمُغيّر الخطوة إلى جانب التحكم بالفولتية في حال تركيبه على محولات القدرة الموصولة بالمولدات (Generator Step-Up Transformer - GSUT) ألا وهي التحكم بمقدار القدرة غير الفعالة (Reactive power) المُصدّرة أو المُستجرة من الشبكة عبر هذا المحول.

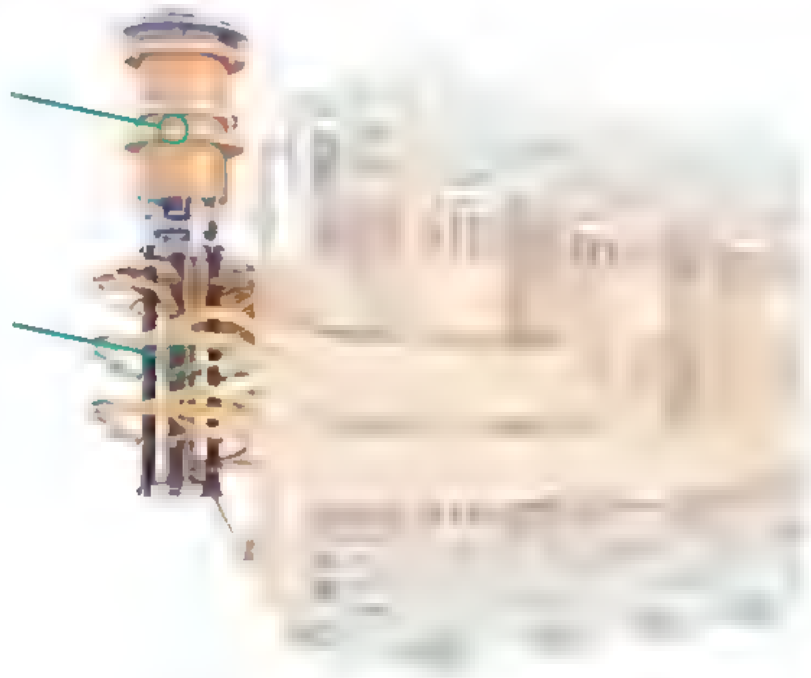
أما فيما يخص مكان تركيب مُغيّر الخطوة فإنه بالعادة يتم تركيبه على ملفات الفولتية المرتفعة (HV winding) وذلك يعود لعدة أسباب أهمها:

- ✓ تيار ملفات الفولتية المرتفعة عادة ما يكون قليل مقارنة بتيار ملفات الفولتية المنخفضة مما يتيح وصل وفصل الملفات الإضافية بشكل أكثر أماناً وبقوس كهربائي أقل يُمكن إخماده بسهولة.
- ✓ ملفات الفولتية المرتفعة تكون مُثبتة خارج ملفات الفولتية المنخفضة مما يُسهّل صيانة مُغيّر الخطوة في حال وجود عطل.
- ✓ عدد لفات ملفات الفولتية المرتفعة أكبر منها لملفات الفولتية المنخفضة مما يُعطي مساحة أكبر لتركيب مُغيّر الخطوة.
- ✓ عادة ما تكون ملفات الفولتية المرتفعة موصولة بطريقة النجمة (Star - Y) مما يُسهّل تركيب مُغيّر الخطوة وذلك لوجود نقطة التعادل (Neutral point).

ولا تعي الأسباب سابقة الذكر عدم إمكانية تركيب مُغيّر الخطوة على ملفات الفولتية المنخفضة، بل يُمكن ذلك في بعض الحالات الخاصة.

مُغيّر الخطوة - Tap Changer

مفتاح التحويل
Diverter Switch
محدد الخطوة
Tap Selector



الشكل رقم (1-50)

وقبل الحوض في مبدأ عمل مُغيّر الخطوة لا بُد من معرفة تصنيفاته وفقاً للأوجه التشغيلية (Operational aspects)، حيث ينقسم إلى نوعين رئيسيين:

✓ (On-load Tap-changer OLTC)

يُمكن تغيير وضعيّة هذا النوع من مُغيّرات الخطوة = الانتقال من خطوة لأخرى = أثناء عمل المحول أي وهو مُكهرب (Energized) ويُرمز له بالرمز (OLTC)، وفي هذا النوع عادة ما يكون فرق الفولتية بين الخطوات المتتالية أو ما يُسمى بفولتية الخطوة (Step voltage) ما مقداره ($\pm 2.5\%$ - $\pm 0.8\%$) بالمئة من الفولتية الإسمية، كما ويكون عدد الخطوات (Taps) قُرابة 17 خطوة أو أكثر من ذلك لمحولات القدرة الكبيرة وتختلف من محول لآخر وفقاً لعدة معايير.

✓ (Off-circuit أو De-energized Tap-changer OCTC or DETC)

لا يُمكن تغيير وضعيّة هذا النوع من مُغيّرات الخطوة إلا في حالة كان المحول غير مُكهرب (De-energized) و يُرمز له برمزتين أساسيتين وهما (OCTC أو DETC)، وفي هذا النوع عادة ما يكون فرق الفولتية بين الخطوات المتتالية أو ما يُسمى بفولتية الخطوة (Step voltage) ما مقداره ($\pm 2.5\%$) بالمئة من الفولتية الإسمية، وفي هذا النوع عادة ما يكون عدد الخطوات (Taps) من (3 إلى 5) خطوات فقط.

• أنواع مُغيّرات الخطوة من نوع (On-load Tap-changers OLTC)

يُمكن تصنيف مُغيّرات الخطوة (Tap-changers) من النوع (On-load) وفقاً لعدة أوجه منها ما هو حسب آلية العمل ومنها ما هو تركيبي كالآتي:

○ حسب آلية العمل

تُصنف مُغيّرات الخطوة وفقاً لآلية العمل (Principle of operation) إلى ثلاث أصناف رئيسية:

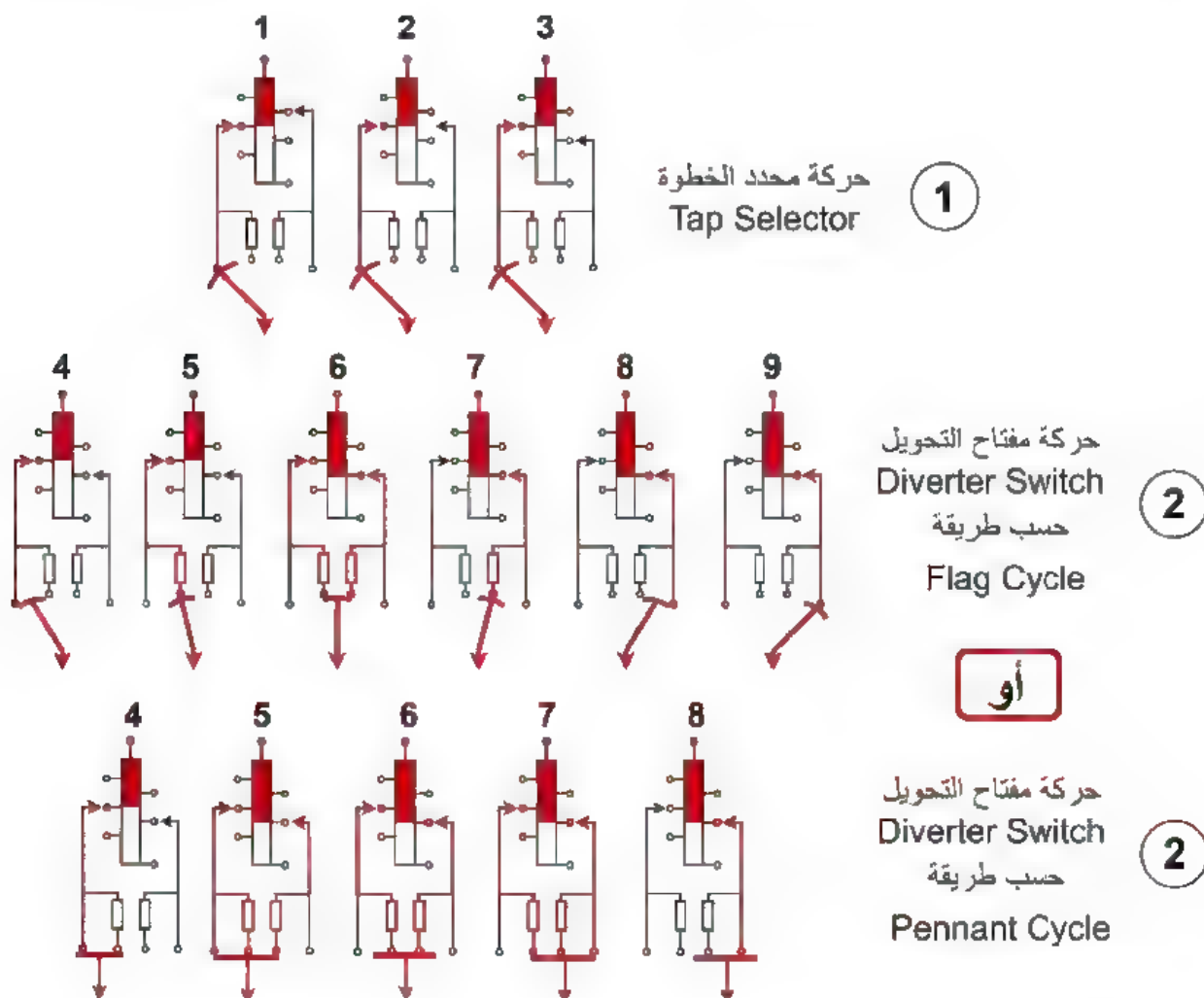
- مُغيّرات خطوة (Tap-changers) ذات مُحدد خطوة (Tap selector) مُنفصل (Separated) عن مفتاح التحويل (Diverter switch) ويُسمى (Resistive Diverter Switch OLTC):

يتم تحديد الخطوة المُراد التحويل عليها بإستخدام مُحدد خطوة (Tap selector) دون حمل (Load free) وبعد ذلك يتم تحويل مسار التيار بإستخدام مفتاح التحويل (Diverter switch) إما بطريقة (Flag) أو بطريقة (Pennant) كما يُظهر في الشكل (1-51).

ويكون مفتاح التحويل (Diverter switch) في حُجرة ريت محتلفة عن حزان الزيت الرئيسي، أما فيما يخص مُحدد الخطوة (Tap selector) فإنه يكون مع مفتاح التحويل بنفس حُجرة الزيت أو مع الملفات في الخزان الرئيسي للمحول، ويعود السبب وراء جعل مفتاح التحويل (Diverter

(switch) في حُجرة منفصلة لتجنب تلوث زيت الخزان الرئيسي للمحول بالكربون وغيره من الغازات الناتجة عن حركة هذا المفتاح وما ينتج عنها من شرارة قوس كهربائي ونقاط إحماء.

وفي هذا النوع من مُغيّرات الخطوة يقوم محرك كهربائي بتحريك مُحدد الخطوة (Tap selector) وكذلك يقوم بشحن الزنبرك (Spring-loaded mechanism) المسؤول عن تحريك مفتاح التحويل (Diverter switch) برمن حركة يُقدر من (40ms - 60ms) ملي ثانية.

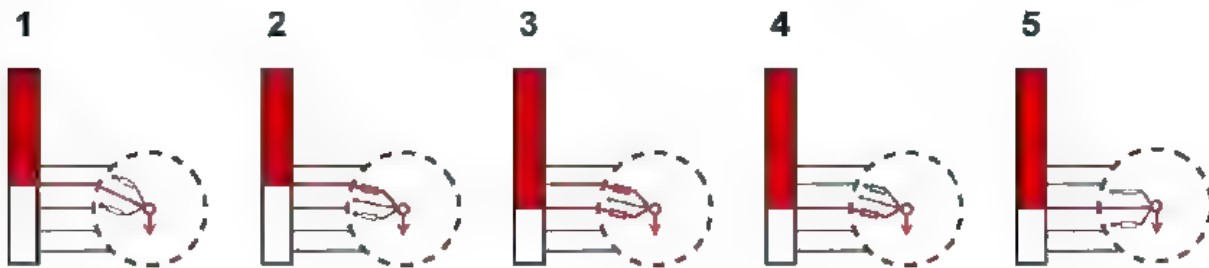


الشكل رقم (1-51)

■ مُغيّرات الخطوة (Tap-changers) ذات مُحدد خطوة (Tap selector) مُدمج (Combined) مع مفتاح التحويل (Diverter switch) ويُسمى (Resistive Selector Switch OLTC):

حيث يتم تحديد الخطوة و التحويل عليها بنفس الوقت كما هو موضح بالشكل (1-52)، كما ويكون مُحدد الخطوة (Tap selector) مع مفتاح التحويل (Diverter switch) في نفس حُجرة الزيت والتي تكون مُنفصلة عن زيت الخزان الرئيسي للمحول. ويمتاز هذا النوع بالسعر الأقل نسبياً مقارنة بالنوع سابق الذكر (Diverter switch OLTC)، ويتم إستخدامه عادة بالمحولات متوسطة القدرة

وفي هذا النوع من مُغيّرات الخطوة يتم التحويل بخطوة واحدة (One Step) باستخدام محراء كهربائي لشحن الزنبرك (Spring-loaded mechanism) المسؤول عن عملية التبديل برمن حركة يُقدر (40ms - 180ms) ملي ثانية



الشكل رقم (1-52)

- مُغيّرات الخطوة (Tap-changers) ذات مفتاح تبديل رئيسي (Change-over switch): يتم استخدام مفتاح التبديل الرئيسي في حال كان مُغيّر الخطوة من نوع التبديل العكسي (Reversing changeover OLTC) أو من نوع التبديل ذو الخطوات الكبيرة والصغيرة (Course/Fine tapping OLTC) وسيتم التطرق لتركيب هاذين النوعين لاحقاً

ملحوظة (1-9): تجدر الإشارة إلى وجود نوع آخر من مُغيّرات الخطوة (Tap-changers) واسعة الانتشار في أمريكا الشمالية والتي تعتمد على محاثات (Reactors) عوضاً عن المقاومات (Resistors)، وعادة ما يتم استخدامه في حال كان مُغيّر الخطوة مثبت على ملفات الفولتية المنخفضة (LV winding) لما لهذا النوع من قدرة على تحمل التيارات المرتفعة.



ملحوظة (1-10): في بداية تسعينيات القرن العشرين (1990's) تم استخدام مُغيّرات الخطوة (Tap-changers) ذات حُجرة تحويل مُفرغة من الهواء (Vacuum type) لما لهذا النوع من مميزات أبرزها الحجم الصغير نسبياً بالإضافة إلى تلوث زيت أقل مما يعني فترات صيانة أكبر قد تصل إلى عشرات السنوات.



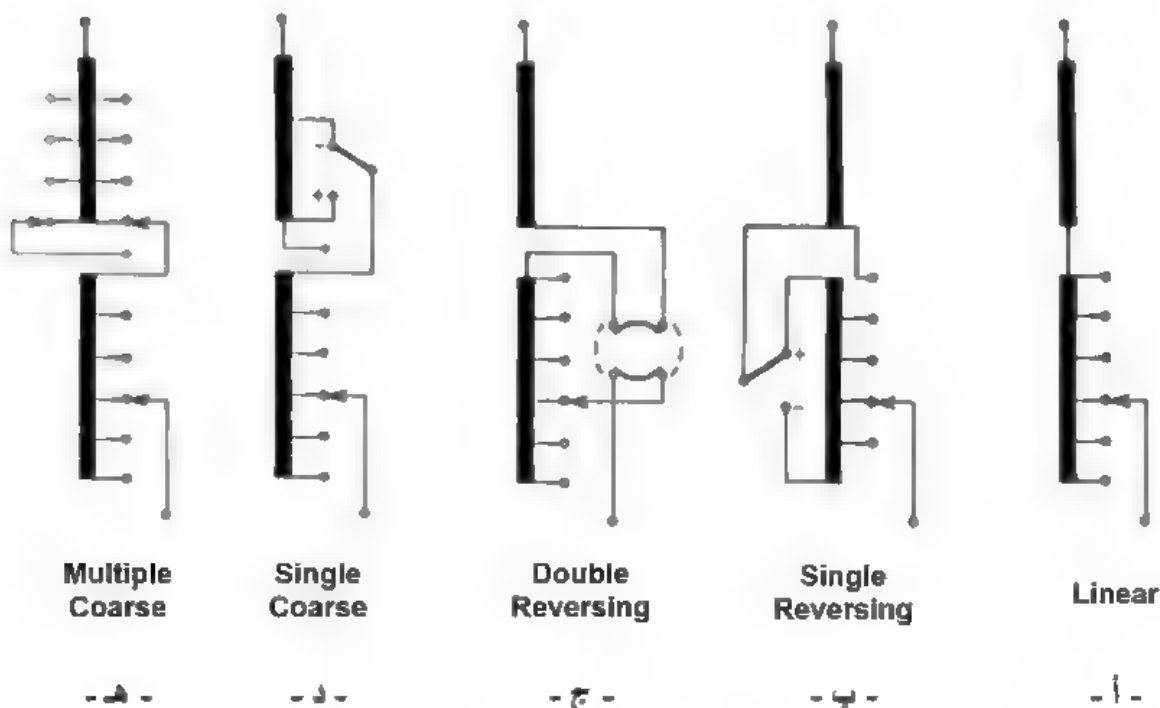
○ حسب التركيب

تُصنّف مُغيّرات الخطوة وفقاً للأوجه التركيبية (Arrangement aspects) إلى ثلاث أصناف رئيسية:

- مُغيّر خطوة خطي – Linear tap changer
ويُعد أبسط أنواع مُغيّرات الخطوة وأكثرها إنتشاراً كما هو موضح في الشكل (1-53) (أ)، وعادةً ما يتم استخدامه لنسبة تحويل فولتية أقل من (20%) بالمئة من الفولتية الإسمية.

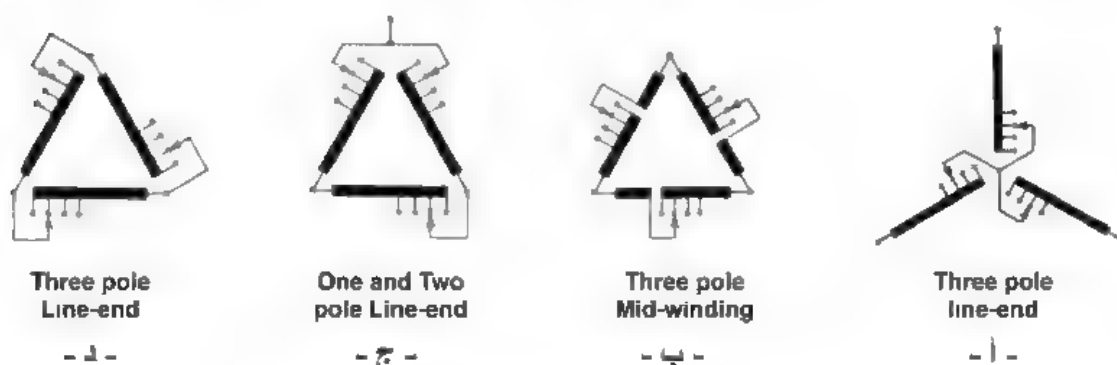
- مُغَيِّر خطوة ذو تبديل عكسي - Reversing changeover OLTC
ويقسم إلى نوعين وهما (Single Reversing OLTC) و (Double Reversing OLTC) كما
هو موضح في الأشكال [(1-53) (ب و ج)].

- مُغَيِّر خطوة ذو خطوات كبير وصغيرة - Coarse/fine tapping OLTC
ويقسم إلى نوعين وهما (Single Coarse/Fine Tapping) و (Multiple Coarse/Fine Tapping)
(Tapping) كما هو موضح في الأشكال [(1-53) (د و ه)].



الشكل رقم (1-53)

أما فيما يخص المحولات ثلاثية الأطوار فإن تركيب مُغَيِّر الخطوة يكون وفقاً للشكل الآتي.



الشكل رقم (1-54)

و الجدول (1-2) يُوضح حُزء من لوحة البيانات (Name Plate) جدول نسبة التحويل لمحولات ذو مُغَيِّر خطوة من نوع (OLTC) لمحولات ثلاثي الطور ثنائي الملفات نسبة تحويله (420kV/20kV) كيلو فولت،

والجدول (1-3) لمحول آخر ذو مُغَيِّر خطوة من نوع (DETC أو OCTC) ثلاثي الطور ثلاثي الملعات نسبة تحويله (20kV/11.5kV/11.5kV) كيلو فولت مسبباً نسبة التحويل ومقدار الإحتلاف في الفولتية.

الجدول رقم (1-2)

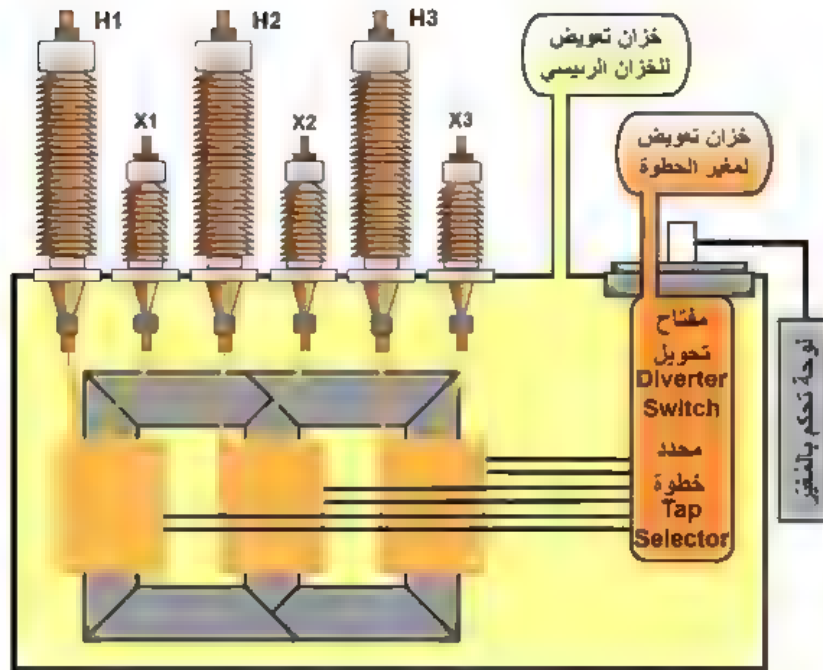
HV				LV	
Position	Tapping	Voltage V	Current A	Voltage V	Current A
1	10%	462000		20000	
2	8.75%	456750			
3	7.5%	451500			
4	6.25%	446250			
5	5%	441000			
6	3.75%	435750			
7	2.5%	430500			
8	1.25%	425250			
9	0%	420000			
10	-1.25%	414750			
11	-2.5%	409500			
12	-3.75%	404250			
13	-5%	399000			
14	-6.25%	393750			
15	-7.5%	388500			
16	-8.75%	383250			
17	-10%	378000			

الجدول رقم (1-3)

HV				LV1		LV2	
Position	Tapping	Voltage	Current	Voltage	Current	Voltage	Current
1	5%	21000		11500		11500	
2	2.5%	20500					
3	0%	20000					
4	-2.5%	19500					
5	-5%	19000					

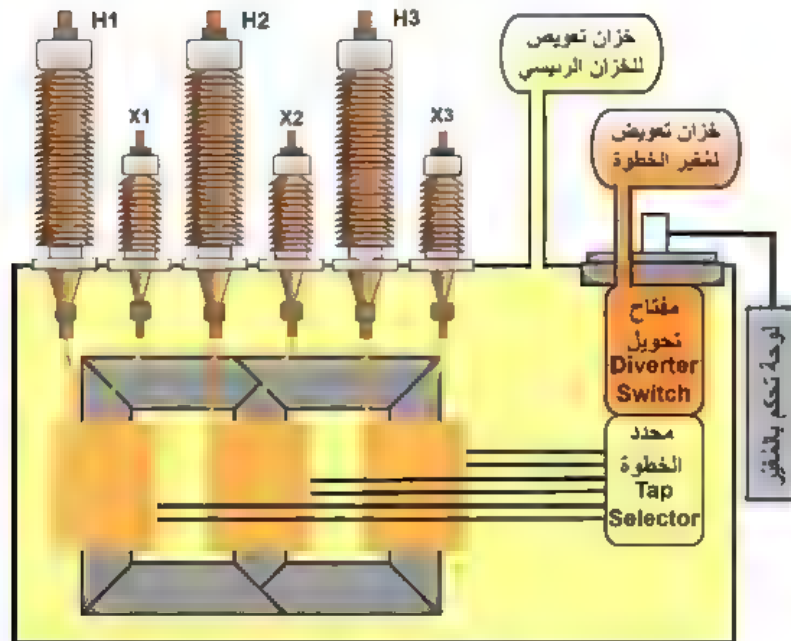
• طرق تركيب حجرة الزيت الخاصة بُمغَيِّر الخطوة مع الخزان الرئيسي

يتم تركيب حجرات الزيت الخاصة بُمغَيِّر الخطوة مع الخزان الرئيسي للمحول وفقاً للطرق التالية:



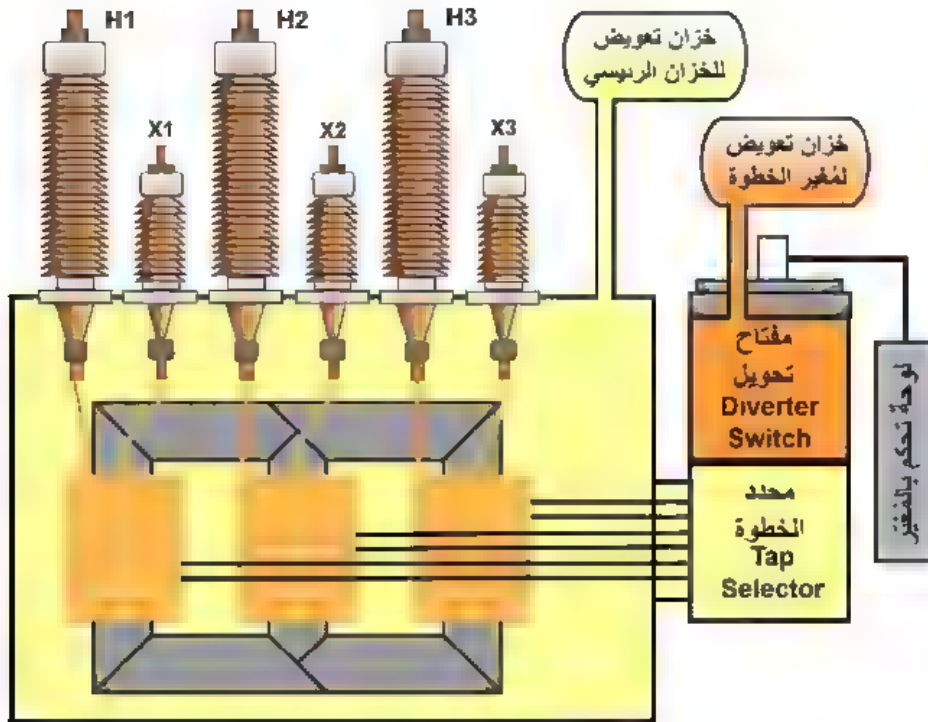
In-tank Selector Switch OLTC

الشكل رقم (1-55)



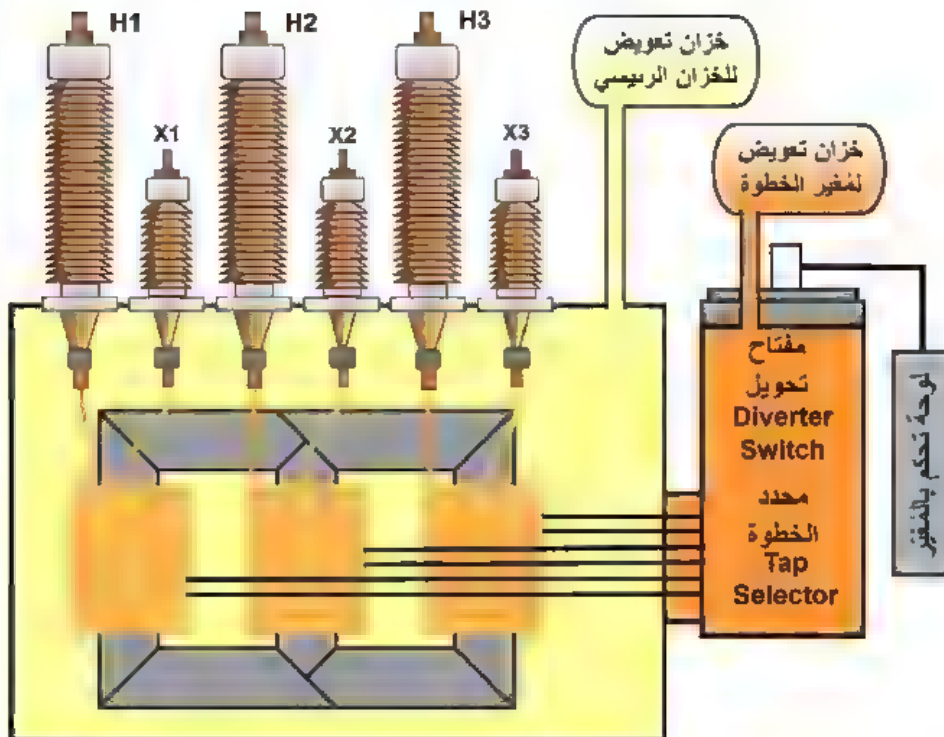
In-tank Diverter Switch OLTC

الشكل رقم (1-56)



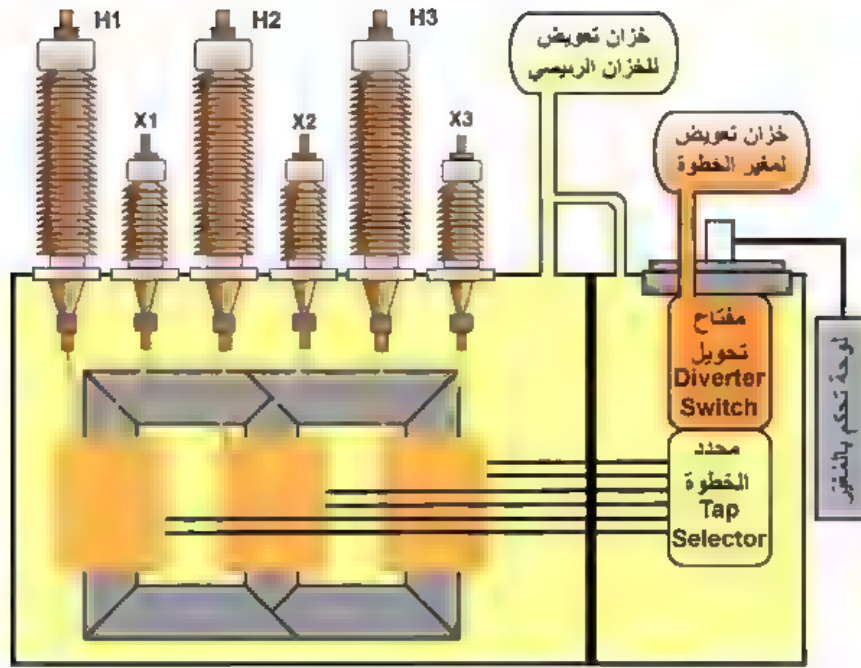
Bolt-on Diverter Switch OLTC

الشكل رقم (1-57)



Bolt-on Selector Switch OLTC

الشكل رقم (1-58)



Double Compartment, In-tank Diverter Switch OLTC

الشكل رقم (1-59)

5.4 نظام العزل - Insulation System

عرّفت اللجنة الكهروتقنية الدولية (IEC) المادة العازلة على أنها جميع المواد أو الأجزاء التي تأمن العزل الكافي بين الأجزاء الموصلة كهربائياً، كما يُمكن تعريف العازل على أنه مادة (Material) أو وسط (Medium) يتم وضعه بين المواد الموصلة الحاملة لفولتية ذات مستوى مختلف بحيث يسمح هذا العازل بمرور تيار صغير نسبياً يُمكن إهماله، وفي التصميم الحديثة للمحولات يتكون نظام العزل من مجموعة من المواد العازلة المختلفة حيث يبين الجدول (1-4) مجموعة من المواد العازلة الأكثر استخداماً في المحولات.

الجدول رقم (1-4)

الرقم	نوع المادة العازلة	الرقم	نوع المادة العازلة
1	Pressboard	8	Pressboard collars and end insulation
2	Kraft paper	9	Inorganic and organic core lamination coating
3	Epoxy powder coating	10	Maple wood structural forms
4	Vulcanized fibre	11	Manila and hemp paper
5	Cotton	12	High density particle-board
6	Enamels	13	Laminated particle-board
7	Liquid insulation (oil)	14	Plastics, Cements adhesive tape, Glass fiber bands, .. etc

• التصنيف الحراري للمواد العازلة

كما ذكر سابقاً أنه أثناء عمل المحول هنالك مجموعة من الصياعات في حالي الحمل واللاحمل ناتجة عن القلب الحديدي والملفات والأجزاء الهيكلية من شأنها رفع درجة حرارة هذا المحول فوق درجة حرارة البيئة المحيطة حسب المعادلة التالية:

$$\text{Operating Temp.} = \text{Ambient Temp.} + \text{Temp. Rise} \quad (1.15)$$

وبما أن نظام العزل يُعتبر من أهم الأنظمة داخل المحول بل وأن العمر الافتراضي للمحول يتم تحديده تبعاً للعمر الافتراضي لنظام العزل الخاص به، فلا بُد من المحافظة على درجة حرارة هذا العزل لكي لا تزيد عن الحد الأعلى المسموح به لهذه المادة العازلة. حيث أن تعرض المادة العازلة لدرجات حرارة مرتفعة فوق حدودها التشغيلية سوف يزيد من معدل تهاكها (Degradation) مؤدياً لفشلها وفشل المحول بالكامل.

الجدول (1-5) يُبين التصنيف الحراري للمواد العازلة المختلفة كما وُزِد في كتاب [المحولات الكهربائية، الجزء الأول، الدكتور كامبليا محمد]، وبالإعتماد على معايير اللجنة الكهروتقنية الدولية - IEC 60085 [2007].

الجدول رقم (1-5)

نوع المادة	درجة الحرارة المئوية	تصنيف الحراري
قطن - حرير - ورق - ألياف - سليولوز (بدون تشرب أو غمر بالزيت)	90°	Y
نفس المواد للتصنيف (Y) ولكنها مشربة بالراتنج (الرزين) أو الزيت - شرائح خشبية - ورق بطبقة ورنيش	105°	A
مينا راتج صناعي - شرائح ورق وقطن محجرة بالعورمالدهيد	120°	E
ميكا - ألياف صناعية - أسبستوس	130°	B
نفس المواد في التصنيف (B) بإضافة مواد رابطة تتحمل الحرارة العالية	155°	F
ألياف صناعية - أسبستوس - ميكا مع إضافة راتنج سيليكوني	180°	H
ميكا - سيراميك - زجاج - كوارتز - أسبستوس - بدون أربطة أو مع راتنج سيليكوني ذو إستقرار حرار عالي جداً	أكبر من 180°	C

• مكونات نظام العزل وفقاً لموقعها

يتكون نظام العزل في غالبية المحولات الكهربائية المغمورة بالزيت وفقاً لمكان وجوده بالمحول من التالي:

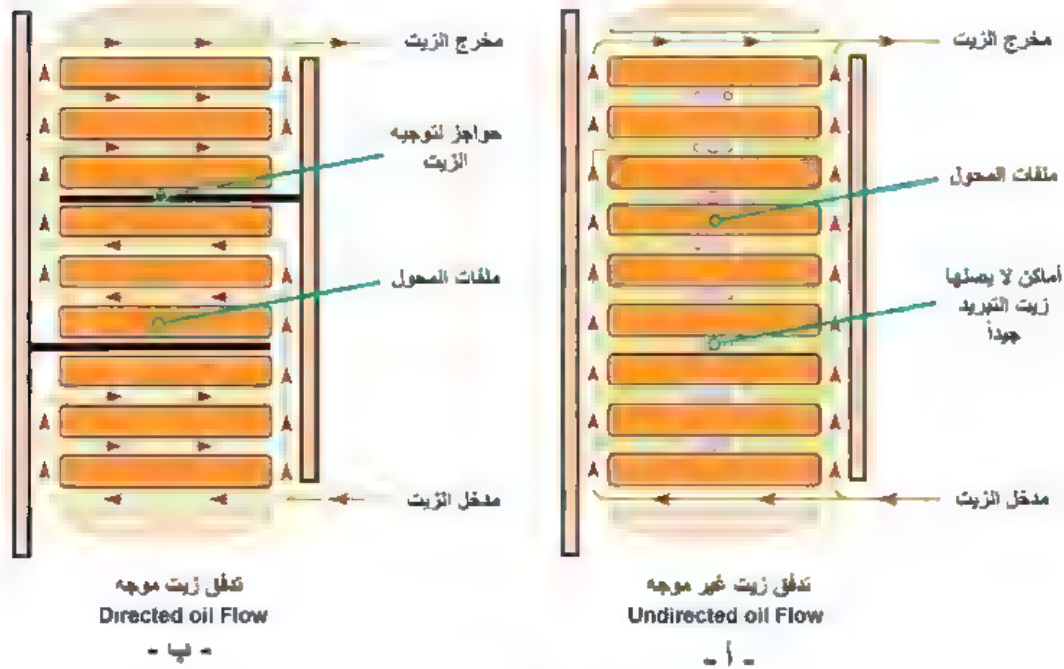
- **عزل رئيسي:** ويتمثل بالريت إلى جانب الألواح المصغوفة (Pressboards) والتي تُمثل جزء العزل الصلب بالمحولات بالإضافة إلى بعض أنواع من الورق، حيث يتواجد هذا العزل:

- بين القلب الحديدي (Core) وملفات العولتية المنخفضة (LV winding).
- بين ملفات العولتية المنخفضة (LV winding) وملفات العولتية المرتفعة (HV winding).
- بين أعلى وأسفل الملفات من جهة، والقلب الحديدي (Core) من جهة أخرى.
- بين ملفات العولتية المرتفعة (HV winding) وخزان المحول (Tank).
- بين القلب الحديدي (Core) وخزان المحول (Tank).

○ عزل ثانوي: و يتمثل بالورق المضغوط من الأنواع التالية (Kraft أو Nomex) أو طلاء مثل (Enamel) و يتواجد هذا العزل:

- بين الموصلات (Conductors).
- بين اللفات (Turns).
- بين الطبقات (Layers).
- بين الرقائق المكوّنة للقلب الحديدي (Laminations).

وفيما يُخص العوازل الصلبة فإلى جانب خصائصها الكهربائية العازلة فإنها أيضاً تلعب دوراً أساسياً في إضفاء قوة ميكانيكية لمواجهة القوى المؤثرة على المحول أثناء نقله و عمله بشكل طبيعي أو أثناء حدوث الأعطال وما ينتج عنها من قوى ميكانيكية كبيرة، بالإضافة إلى أن العوازل الصلبة تتحكم بشكل وأبعاد ممرات التبريد بين الملفات وكذلك تأمن وجود هذه الممرات كما هو الحال في طريقة لف موصلات المحول الحلزونية (Helical) حيث يتم وضع عوازل صلبة (Pressboard) على شكل فواصل صغيرة (Spacers) بين اللفات لتأمن ممر تبريد أفقي أو توجد كأشرطة (Strips) و فواصل (Spacers) بين اللفات (Turns) لتأمن ممرات تبريد عامودية (Ladder duct).



الشكل رقم (60-1)

• أنواع العوازل من حيث الحالة الفيزيائية

يُمكن تصنيف المادة العازلة المستخدمة في المحولات تبعاً لحالتها الفيزيائية كالآتي:

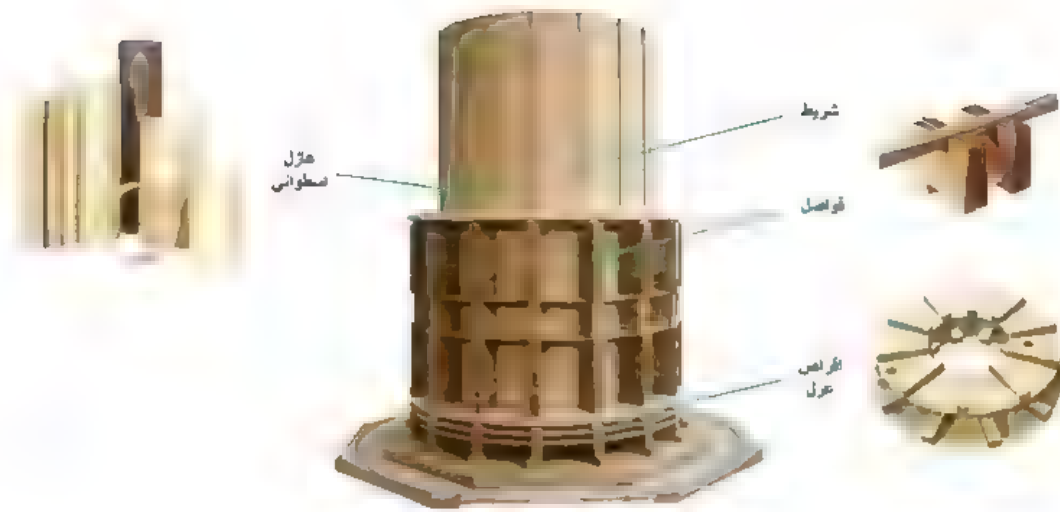
○ العوازل الصلبة

عند إختيار المادة العازلة للمحول إلى جانب خصائصها الميكانيكية لا بُد من مراعاة بعض الخصائص الكهربائية و التي تتمثل في قوة عزل مرتفعة (**High dielectric strength**) و ثابت عزل (**Dielectric constant**) قريب من نظيره لزيت المحول ومعامل قدرة منخفض (**Low Power Factor**) و كذلك يجب أن تكون المادة العازلة خالية من الجزيئات - الأحسام الصغيرة - الموصلة.

و تنقسم العوازل الصلبة داخل المحول إلى الأنواع التالية:

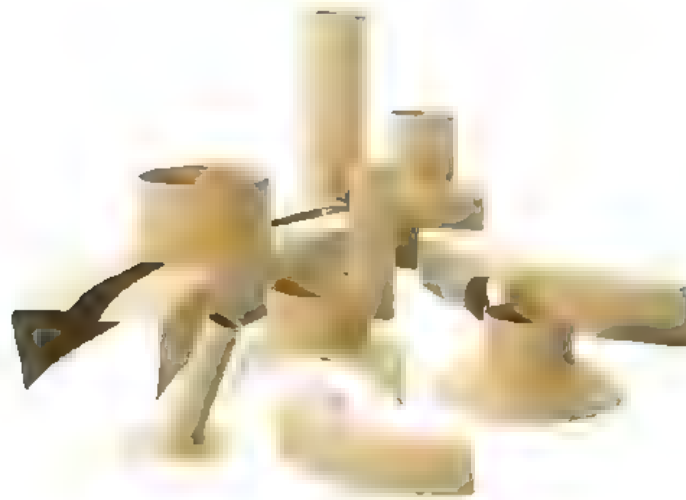
- **الألواح المضغوطة - Pressboards:** تكون ذو أساس سيليلوري حيث يتم تصنيع هذا النوع من العوازل من لب النباتات حيث تدخل في عملية معالجة لتحسين خصائصها الميكانيكية والكيميائية والكهربائية، وتكون ذات صلابة أكبر من الورق المضغوط (**Presspaper**) مما يُعطي شكل ومقاومة ميكانيكية وكهربائية أكبر للملفات، و تكون هذه الألواح المضغوطة على شكل:
 - ✓ **إسطواني (Cylindrical)؛** للعزل بين القلب الحديدي والملفات و بين الملفات المختلفة.
 - ✓ **فواصل (Blocks أو Spacers)؛** للعزل بين الطبقات (**Layers**) و بين الأقراص (**Disks**).
 - ✓ **أشرطة (Strips)؛** حيث توحد بين الطبقات لتأمين ممرات تبريد بين الملفات بالإضافة لحمل قطع العزل الصغيرة أو ما يُسمى بالفواصل (**Blocks أو Spacers**).
 - ✓ **أقراص فاصلة (Disk spacer)؛** للعزل بين أقراص الملفات أو بين نهايات الملفات من الأعلى و من الأسفل.

و الشكل (1-61) بين الأشكال المختلفة للعوازل الصلبة من النوع (**Pressboards**) داخل المحولات الكهربائية.



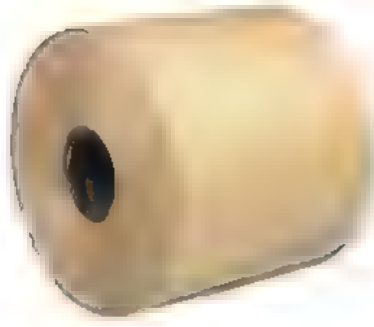
الشكل رقم (1-61)

كما وتوجد أشكال أخرى لهذا النوع من العازل، فمنها ما يُستخدم لتأمين العزل اللارم لنهايات الملفات (Leads) و نقاط إلتقاء موصلات عوازل الإختراق (Bushing) و ملفات المحول كما هو مبين بالشكل (1-62).



الشكل رقم (1-62)

- **الورق المضغوط - Presspaper:** يكون ذو أساس سيليلوزي حيث يتم تصنيع هذا النوع من العوازل من لب الباتات وتدخل في عملية معالجة لتحسين خصائصها الميكانيكية والكيميائية والكهربائية و يتكون من طبقة أو عدة طبقات من الورق وله عدة أنواع:
- ✓ **ورق الكرافت (Kraft paper):** يُعتبر من المواد العازلة الرئيسية داخل المحول، ويستخدم لعزل بين الطبقات (Layers) في المحول.



الشكل رقم (1-63)

✓ **الورق المتعرج (Corrugated paper):** حيث يُستخدم هذا النوع من الورق المتعرج بين الملفات لتأمين ممرات تبريد عامودية عوضاً عن استخدام الأشرطة (Strips) و الفواصل (Spacers) سابقة الذكر كما هو موضح في الشكل (1-64)، حيث يُستخدم هذا النوع بشكل واسع في المحولات ذات السعة القليلة.



الشكل رقم (1-64)

✓ **الورق المُقَوَّج أو المُجَعَد (Crepe paper):** وهو عبارة عن ورق عزل ذو مرونة عالية وسمك أقل من الأنواع سابقة الذكر كما هو موضح في الشكل (1-65)، حيث أنه يُستخدم في عزل الموصلات داخل المحول مثل أطراف الملفات أو الموصلات الواصلة بين الملفات ومُغَيِّر الخطوة (Tap-changer).



الشكل رقم (1-65)

عادة يتم إشباع الورق المضغوط (Presspaper) و الألواح المضغوطة (Pressboards) بالزيت وذلك لتجنب وجود فجوات هوائية داخل هذا النوع من العوازل وذلك لرفع خصائصه العازلة ولزيادة قدرته على تبديد الحرارة (Heat dissipation)، وينيب الجدول (1-6) تأثير غمر الألواح المضغوطة (Pressboards)

بالريت على قوة العزل (Dielectric strength) الخاصة بها، مع التنويه على أن وحدة قياس قوة العزل المُشار إليها بالجدول هي (kV/mm) كيلوفولت لكل مليمتر.

الجدول رقم (1-6)

السماكة، ملم	قوة العزل في الهواء، كيلوفولت/ملم	قوة العزل في الزيت، كيلوفولت/ملم
1	≥12	≥45
2	≥12	≥35
3	≥12	≥35
5	≥12	≥35

كما وتُجدر الإشارة إلى تحنّب أغلب مُصنّعي المحولات إستخدام العازل الصلب الحاف ذو الأساس السيليلوزي وذلك لما له من خصائص عاشقة للرطوبة (Hygroscopic)، لذلك يتم تجفيفه (Dried) وإشباعه بسائل قد يكون زيت كما ذكر سابقاً أو الورنيش (Varnish) أو الرزين (Resin) للتقليل من إمتصاصه للرطوبة و الحفاظ على خصائصه العازلة. بحيث تُحدد المادة التي يتم إشباع العازل الصلب بها فيما إذا كانت زيت أو ورنيش أو رزين أو غيرها من المواد القدرة الحرارية (Thermal capability) لهذا العازل كما هو مبين في الجدول (1-5).

وتنحصر طرق تجفيف المادة العازلة قبل إشباعها بالزيت بالطرق التالية:

- ✓ تمرير تيار داخل الموصلات مما يرفع درجة حرارتها و حرارة العزل ويُساعد على تحليص العازل من الرطوبة.
- ✓ خفض الضغط داخل المحول مما يساعد على خروج الرطوبة من المادة العازلة (Under vacuum).
- ✓ تدوير هواء ساخن داخل المحول تتراوح درجة حرارته (90° - 120°) درجة مئوية مما يرفع درجة حرارة العازل ويساعد على تخليصه من الرطوبة.
- ✓ تدوير زيت ساخن داخل المحول مما يرفع درجة حرارة العازل ويساعد على تخليصه من الرطوبة. وهناك طرق أخرى مثل (Hot oil spray drying) و (Kerosene Vapor Phase Drying) و (Low frequency heating).

○ العوازل ذات الأساس غير الصلب

بالإضافة إلى العوازل الصلبة سابقة الذكر، هنالك مواد عازلة ذات أساس غير صلب تكون جيباً إلى حنّب مع العوازل الصلبة و تتمثل بالأتي:

- مادة الورنيش (Varnish) و المينا (Enamel) وغيرها من المواد التي تُستخدم عادة لعزل الموصلات داخل المحول حيث تكون هذه المواد بالأساس بالحالة السائلة ومن ثم تتحول للحالة الصلبة بعد طلائها على الملفات أو رقائق القلب الحديدي المُراد عزلها.
- الزيت: ويُمثل أحد أنواع العزل غير الصلب أو السائل داخل المحول.

5.5 زيت المحول – Transformer oil

يتم إحتواء الزيت في الخزان الرئيسي وخزان التعويض للمحول بحيث يقوم هذا الزيت بغمر الجزء المعدّل من المحول والذي يتمثل بالقلب الحديدي والملفات، ولذلك سُميت هذه المحولات بالمحولات المغمورة بالزيت. و تكمن وظيفة هذا الزيت بالآتي:

- ✓ العزل؛ يُعد الزيت من المواد العازلة الرئيسية داخل المحول لما له من دور في عزل الأجزاء الحاملة للفولتية أو الموصلة عن بعضها البعض، بالإضافة إلى دور الزيت في إخماد شرارة القوس الكهربائي (Arc flash) داخل المحول في حال حدوثها.
- ✓ منع أكسدة الأجزاء المعدنية داخل المحول؛ يأمّن الزيت طبقة تُغلف جدران هذه الأجزاء المعدنية الداخلية للمحول مانعاً أكسدتها.
- ✓ التبريد؛ يُساعد الزيت على تبديد حرارة الملفات والمواد العازلة الصلبة داخل المحول وذلك بزيادة سعة تبديد الحرارة (Heat dissipation capacity).
- ✓ أسباب تشخيصية؛ يُعتبر الزيت الوسط الحاصل للغازات الناتجة عن الأعطال داخل المحول وكذلك الجزيئات الناتجة عن تحلل المواد العازلة كظهور مركبات السيليلوز التي تدل على تدهور المادة العازلة داخل المحول، و أيضاً يساعد على قياس نسبة الرطوبة داخل المحول.

• الخصائص المثالية لزيت المحولات

لا تُد من توافر بعض الشروط في الزيوت المُستخدمة في المحولات الكهربائية حتي يتسنى لها القيام بالوظائف المُناطة بها سابقة الذكر، وتتلخص هذه الخصائص بالآتي:

- ✓ قوة عزل مرتفعة – High Dielectric Strength
- ✓ قوة تحمل لإرتفاع الفولتية المفاجئ – High Impulse Strength
- ✓ مقاومة مرتفعة لتسرب التيار من خلاله – High Volume Resistivity
- ✓ معامل قدرة منخفض – Low Power Factor
- ✓ حرارة نوعية و موصلية حرارية مرتفعة – High Specific Heat and Thermal Conductivity
- ✓ إستقرار كيميائي – Chemical Stability
- ✓ لزوجة منخفضة – Low Viscosity
- ✓ درجة حرارة نقطة وميض مرتفعة – High Flash Point
- ✓ القدرة على إخماد القوس الكهربائي – Good Arc Quenching

بالإضافة إلى أن يكون غير قابل للإشتعال وغير سام وذو سعر رخيص ومتوافر في الأسواق. وكما هو معلوم أن هذه الخصائص من الصعب جداً توافرها في زيت واحد بعينه إلا أن مُصممو المحولات ذهبوا إلى استخدام الزيوت التي يتوافر فيها أكبر قدر من هذه الخصائص كما سيتم شرحه لاحقاً.

• أنواع الزيت المستخدم في المحولات:

○ زيت معدني ذو أساس نفطي - Mineral Petroleum Based Oil

تم استخدام هذا الزيت في أواخر القرن التاسع عشر (1880's) مع بدايات تصنيع المحولات بشكل تجاري، وهو يتكون من خليط هيدروكربوني يتم اشتقاقه من النفط الخام عبر عمليات التقطير. كما وتُعتبر الزيوت المعدنية أكثر أنواع الزيوت إنتشاراً كوسط عازل ووسيلة تبريد في المحولات الكهربائية لما لها من خصائص عازلة ولزوجة منخفضة بالإضافة إلى توافرها في الأسواق العالمية وسعرها المتدني نسبياً، وتنقسم هذه الزيوت إلى الأنواع التالية:

- زيوت هيدروكربونية مُشبعة (Saturated hydrocarbons) مثل الزيت البارافيني (Paraffins).
- زيوت أيزو بارافينية (Iso-Paraffins).
- زيوت نافثينية (Naphthenes).
- زيوت هيدروكربونية غير مُشبعة (Unsaturated hydrocarbons) مثل الزيت العطري (Aromatics).

وفي الوقت الحاضر ونظراً للتأثير السلبي للزيوت المعدنية على البيئة تم وضع مجموعة من المتطلبات والإجراءات عند التعامل مع هذا النوع من الزيوت و تصنيعه.

○ زيت أسكاريل - Askarels

الأسكاريل (Askarels) هو اسم عام يُطلق على زيت العزل الإصطناعي (Chlorinated hydrocarbon) أو (Polychlorinated biphenyls - PCB) وله أسماء تجارية عدة منها (Pyranol, Pyroclor & Clophen)، حيث تم استخدامه في أوائل القرن العشرين (1930's) كبديل لزيت المحولات المعدني (Mineral oil) نظراً لعدم قابليته للإشتعال (Non-flammable) مقارنة مع الزيوت المعدنية، بالإضافة إلى سعره المتدني نوعاً ما.

إلا أن سُميّة هذا النوع من الزيوت (Askarels - PCB) وتأثيره السلبي على صحة الإنسان و الحيوان إلى جانب أضراره البيئية أدى إلى تطاير الجهود للتخلص منه ومن الزيوت المعدنية (Mineral oil) الملوثة به، حيث شرعت بعض المنظمات الدولية في سبعينيات القرن المنصرم (1970's) لوضع قوانين للحد من إنتشار هذا النوع من الزيوت كما هو الحال حيث ألزم معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE) الشركات المُصنعة للمحولات بوضع حملة على لوحة البيانات (Name Plate) الخاصة بالمحول تنص على أن المحول غادر المصنع بنسبة (PCB) أقل من (2 ppm) في الزيت. كما و تُجدر الإشارة إلى أن

مصطلح الزيت المعدني الملوّث بالـ(PCB) يُطلق على الزيت المعدني الذي يحتوي ما مقداره (50 ppm) أو أكثر من الـ(PCB)

○ موائع السيليكون - Silicon Fluids

الموائع السيليكونية و بشكل أدق تُسمى (polymerized siloxanes) أو (polysiloxanes) تتكون من خليط من بوليمرات عضوية وغير عضوية بحيث يكون الجزء غير العضوي مكون من عنصري السيليكون (Si) و الأكسجين (O).

بدأ إستخدام هذه الموائع في المحولات في نهاية سبعينيات القرن الماضي (1970's) بشكل أساسي كأحد بدائل زيت الأسكاريل (Askarels - PCB) لما له من درجة حرارة نقطة اشتعال (Fire point) أعلى مما يُقلل من خطر حدوث الحرائق، بالإضافة إلى مقاومته للأكسدة بشكل مرتفع. ولكن لم يُحقق هذا النوع من الزيوت انتشاراً كبيراً إلا في المحولات المُستخدمة في القطارات أو ما يُسمى بمحولات الجرّ (Traction transformers) و في محولات التوزيع منخفضة السعة (Low Capacity) بالإضافة إلى المحولات المستخدمة في التطبيقات ذات الحرارة المرتفعة خشية حدوث الحرائق.

و من أوجه قُصور هذا النوع من الزيوت اللزوجة العالية مما يعني قدرة على التبريد منخفضة، بالإضافة إلى معدل التحلل المنخفض (Low Biodegradability) مما يعني أضرار بيئية مرتفعة في حال تسريه كما ويُشكل التخلص (Disposal) من هذا الزيت عائقاً آخر لإستخدامه نتيجة لأضراره البيئية سابقة الذكر وكذلك ضرورة تغيير كامل الزيت المُتقادم وذلك لعدم عدم إمكانية معالجته.

حديثاً قامت اليابان بتطوير نوع من الزيت السيليكوني قليل اللزوجة (Low-Viscosity Silicone fluid) و تم إستخدامه في محولات القوى ذات السعة قرابة الـ(30 MVA) بمستوى فولتية (66kV)، وقبل اليابان لا يُعرّف أي استخدام للزيت السيليكوني في محولات القوى الكهربائية.

○ إسترات إصطناعية - Synthetic esters

تمت صياغة تركيبة هذا النوع من الإسترات المُكوّن من رابطة كيميائية تتشكل نتيجة لتفاعل الكحول مع الأحماض الدهنية (Fatty acids) لأول مرة في نهاية سبعينيات القرن الماضي (1970's) إلى أن تم إستخدامه بشكل تجاري لأول مره في بداية تسعينيات القرن نفسه في ألمانيا ومن ثم تم إعتماده من قبل شركة توزيع الكهرباء الأردنية (JEPCO) في عام (1995) لمحولات التوزيع السكنية لما له من درجة حرارة نقطة اشتعال (Fire point) مرتفعة مما يُقلل من خطر حدوث الحرائق، بالإضافة إلى مقاومته للأكسدة بشكل مرتفع و معدل تحلل (Biodegradability) أعلى من الزيوت المعدنية والسيليكونية مما يجعله صديق للبيئة أكثر، لذلك شاع استخدام هذه الزيوت في المحولات المُستخدمة في التطبيقات ذات الحرارة المرتفعة وأيضاً في الأماكن المأهولة بالسكان خوفاً من الحرائق بالإضافة إلى الأماكن التي يُعتبر تلوث البيئة فيها من الأمور الخطيرة جداً. ومن الأمثلة على الإسترات الإصطناعية زيت الـ(MDEL 7131).

○ إسترات طبيعية - Natural esters

بدأت الدراسات حول هذا النوع من الزيوت في بداية تسعينيات القرن الماضي (1990's) إلى أن تم استخدامه بشكل تجاري لأول مره في بداية القرن الحالي. وأيضاً يُسمى بالزيت النباتي (Vegetable oil) و تتكون هذه الزيوت النباتية في تركيبها الأساسي من ثلاثي الغليسيريد (Tri-glycerides) حيث يتم إنتاجها من الصويا أو دوار الشمس، و تُعتبر إحدى بدائل الزيوت المعدنية والسيليكونية المُستخدمة في المحولات لما لها من درجة حرارة نقطة اشتعال مرتفعة (High Fire point) مما يُقلل من خطر حدوث الحرائق، بالإضافة إلى مُعدل تحلل (Biodegradability) أعلى من الزيوت المعدنية والسيليكونية مما يجعله صديق للبيئة أكثر، لذلك شاع استخدام هذه الزيوت في المحولات المستخدمة في التطبيقات ذات الحرارة المرتفعة وأيضاً في الأماكن المأهولة بالسكان خوفاً من الحرائق بالإضافة إلى الأماكن التي يُعتبر تلوث البيئة فيها من الأمور الخطيرة جداً كنظيرتها الإصطناعية كما وتتفق الإسترات الإصطناعية والطبيعية في الخصائص سابقة الذكر إلا أنها تفتقر في أن الإسترات الطبيعية تمتلك خصائص غير مستقرة إتجاه التأكسد (Oxidation).

ومن الجدير بالذكر أن الإسترات الطبيعية و الإصطناعية يُمكنها إمتصاص كمية رطوبة أكثر من نظيرتها المعدنية والسيليكونية دون التأثير على خصائص هذه الزيوت العازلة للكهرباء، بالإضافة إلى أنها صديقة للبيئة في حال تسربت من المحولات أو في حال تم التخلص منها على النقيض من الزيوت المعدنية والسيليكونية والأسكارين وذلك لقابليتها المرتفعة على التحلل بالإضافة لعدم سُميتها، كما وأنها تمتلك درجة حرارة نقطة اشتعال مرتفعة (High Fire point) مما يجعلها أكثر أماناً إتجاه الحرائق. وبين الجدول (1-7) استخدامات هذه الزيوت:

الجدول رقم (1-7)

نوع المحول	نوع الزيت			
	معدني	سيليكوني	إستر إصطناعي	إستر طبيعي
محول قدرة	يُستخدم بشكل واسع الانتشار	لا يُستخدم حالياً	يُستخدم بشكل غير واسع الانتشار	يُستخدم بشكل غير واسع الانتشار
محول توزيع	يُستخدم بشكل واسع الانتشار	يُستخدم بشكل واسع الانتشار	يُستخدم بشكل واسع الانتشار	يُستخدم بشكل واسع الانتشار
محول جرّ	يُستخدم بشكل واسع الانتشار	يُستخدم بشكل واسع الانتشار	يُستخدم بشكل واسع الانتشار	لا يُستخدم حالياً
محول قياس	يُستخدم بشكل واسع الانتشار	لا يُستخدم حالياً	لا يُستخدم حالياً	لا يُستخدم حالياً

و الجدول (1-8) يأتى مقارنة بين خصائص أنواع الريبوت المختلفة حتى يسهل فهم هذه الخصائص وفقاً للمجلس الدولي للأنظمة الكهربائية الكبيرة CIGRE:

الجدول رقم (1-8)

السعر النسبي	1	10	4 8	2	5
درجة حرارة نقطة الإنصهار	-50°	-50°	-45°	-15°	-45°
تصنيف الاشتعال	0	K	K	K	L
درجة حرارة نقطة الاشتعال °C	170° إلى 180°	>350°	>300°	>350°	لا يوجد
درجة حرارة نقطة الوميض °C	160° إلى 170°	>300°	>250°	>300°	لا يوجد
التشبع بالماء عند درجة حرارة 23° ppm	55	220	2600	1100	35
فولتية الإنهيار 25mm gap (IEC) kV	>70	50	>75	>75	>30
إستقرارية إتجاه التأكسد	مستقر نوعاً ما	مستقر	مستقر	غير مستقر	مستقر
قابلية التحلل	بطيء	بطيء جداً	سريع	سريع جداً	بطيء
المصدر	تصفية الزيت	مواد كيميائية	مواد كيميائية	يستخرج من المعاصر	مواد كيميائية
المكون الرئيسي	خليط هيدروكربوني مقدر	di-alkyl silicone polymer	Pentaerythritol tetra ester	إستر عطري ذو أساس ثنائي	polychlorinated biphenyl
النوع	نقط خام مكرر ومقطر	إصطناعي	إصطناعي	زيت ثنائي مكرر	إصطناعي
وجه المقارنة	زيت معدني	زيت سيليكوني	إستر إصطناعي	إستر عطري	الأسكاريل
نوع الزيت					

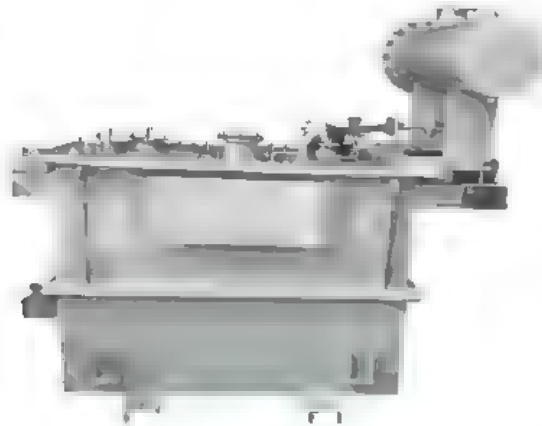
5.6 نظام التبريد - Cooling system

إن ارتفاع درجة الحرارة داخل المحول عن المعدلات الطبيعية يؤدي إلى تقليل العمر الافتراضي للمحول وذلك بزيادة معدل تهالك أو تقادم (**Ageing Rate**) أحد أهم مكوبات المحول الداخلية وهو ورق العزل، وتبعاً لمعهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **IEEE** فإن زيادة درجة حرارة الـ (**Hot spot**) للمحول بما مقداره (6°) درجات مئوية سيؤدي إلى انخفاض عمر المحول الافتراضي للنصف. ومما سبق يُمكن ملاحظة ربط العمر الافتراضي للمحول ككل بالعمر الافتراضي لورق العزل وذلك لأن إنهاء هذا الورق يعني إنهاء المحول ككل بالإضافة إلى عدم إمكانية إستبدال هذا الورق بسهولة كباقي أجزاء المحول في حال فشلها.

و يبقى التساؤل المطروح من أين تأتي هذه الحرارة؟.. و للإجابة على هذا التساؤل يمكن الرجوع إلى الشرح السابق و الخاص بضیاعات المحولات الواقعية والتي تنقسم إلى ضیاعات حمل و ضیاعات لاحتل و هما على حد سواء المصدر الرئيسي للحرارة داخل المحول بالإضافة لدرجة حرارة البيئة المحيطة، لذلك لا بد من وجود نظام تبريد لتبديد هذه الحرارة المُتكوّنة.

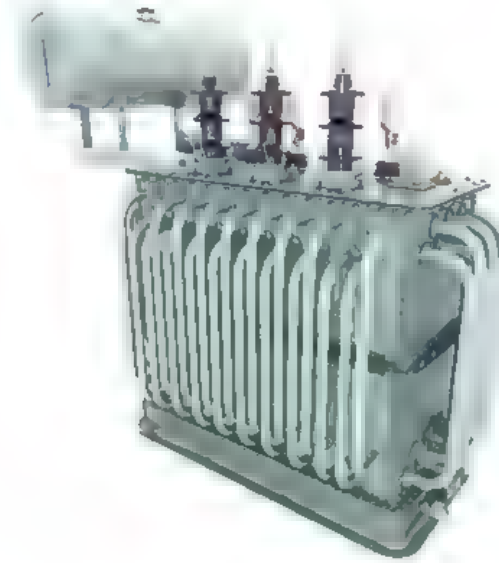
• مكونات نظام التبريد

- **زيت التبريد:** يتم إختيار زيت المحول بعناية فائقة فإلى جانب خصائصه الكهربائية العازلة يتم مراعاة خصائص أخرى كاللزوجة وغيرها من الخصائص الفيزيائية والكيميائية التي تلعب دوراً مهماً في عملية التبريد، كما ويُعتبر الزيت وسط التبريد الداخلي للمحول حيث يكون على تماس مباشر مع الملفات والقلب الحديدي (مصدر الحرارة داخل المحول) مما يُسهل عملية التبادل الحراري.
- **الخزان الرئيسي:** هناك عدة أنواع للحزانات الرئيسية للمحولات وفقاً لكيفية التبريد ومنها:
 - **الخزان ذو الجدران المُسطحة - Plain sheet steel tank:** في هذا النوع من الخزانات يُكتفى بتبادل الحرارة بين الزيت الداخلي والهواء الخارجي عبر جدران الخزان الخارجية فقط دون الحاجة لمبادل حراري مُدمج أو مُنفصل عن جسم الخزان كما هو مبين في الشكل (1-66) وعادة ما يكون من النوع ذو حافة تثبيت علوية (**High Flange Tank Design**)، و هذا النوع من الخزانات واسع الإنتشار لمحولات التوزيع الصغيرة جداً حوالي (50kVA) كيلو فولت أمبير أو أقل.



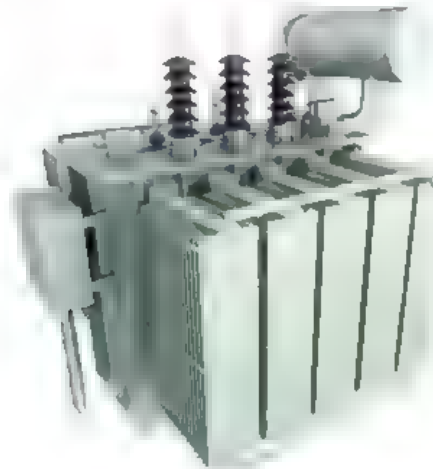
الشكل رقم (1-66)

- **الخزان ذو الأنابيب الجانبية - Tubed tank:** في هذا النوع من الخزانات يتم تبادل الحرارة بين الزيت الداخلي والهواء الخارجي عبر جدران الخزان الخارجية بالإضافة إلى مجموعة من الأنابيب المدمجة بحدود خزان المحول الداخلية عن طريق اللحام (Welding) كما هو مبين في الشكل (1-67)، وهذا النوع من الخزانات واسع الإنتشار لمحولات التوزيع كافة على اختلاف سعتها ما عدا الصغيرة جداً منها والذي يتم إستخدام الخزان ذو الجدران المُسطحة (Plain tank) سابق الذكر.



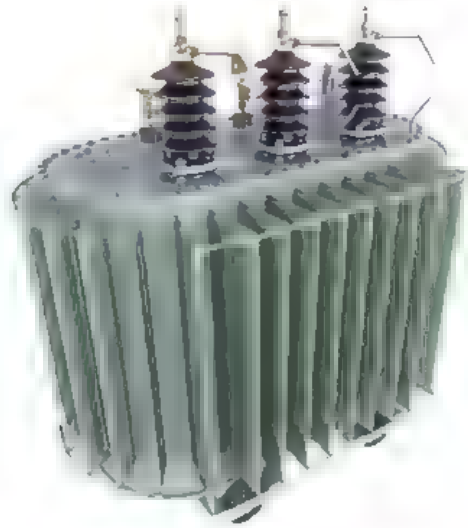
الشكل رقم (1-67)

- **الخزان ذو المُشع - Radiator tank:** يُعد أحد بدائل الخزان السابق – ذو الأنابيب-، وفي هذا النوع من الخزانات يتم تبادل الحرارة بين الزيت الداخلي والهواء الخارجي عبر جدران الخزان الخارجية بالإضافة إلى مُشع (Radiator)، حيث يتم وصله بجدران خزان المحول عن طريق البراغي عبر صمامات لحالات الصيانة كإستبدال المُشع كما هو مبين في الشكل (1-68)، وهذا النوع من الخزانات واسع الإنتشار للمحولات ذات السعة الصغيرة والمتوسطة.



الشكل رقم (1-68)

- الخزان ذو الجدران المتعرجة - **Corrugated tank**: يُعد بديل للخزان ذو الأنابيب (**Tubed tank**)، و المبين في الشكل (1-69).



الشكل رقم (1-69)

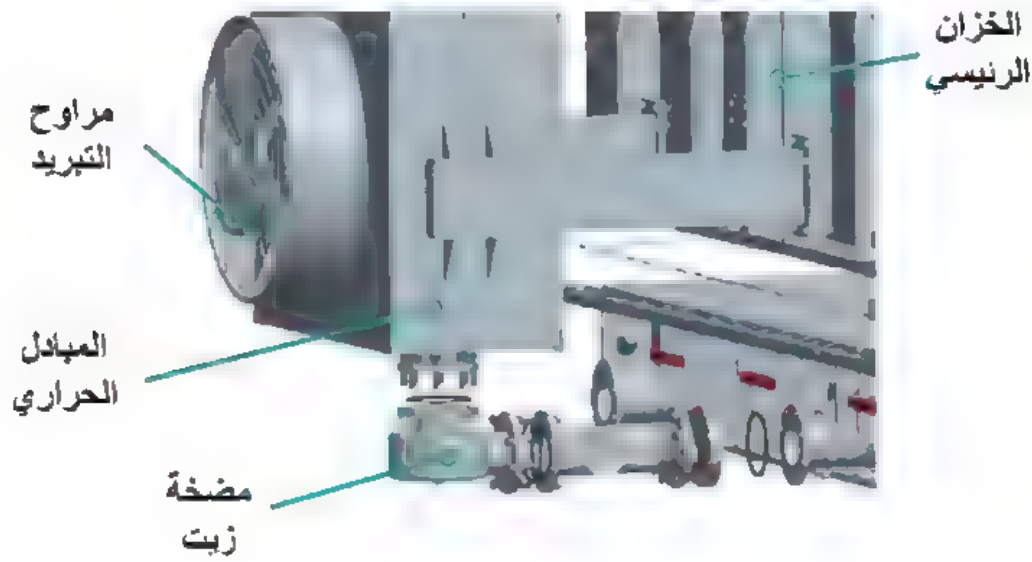
- الخزان ذو المبادل الحراري المنفصل - **Separated cooler tank**: يُعد هذا النوع الأكثر إنتشاراً خاصة للمحولات ذات السعات الكبيرة (**Large Capacities**)، بحيث يكون المبادل الحراري مُنفصل عن جسم الخزان ويتم وصلهما بأنابيب كبيرة قد تحتوي على مضخات في بعض التطبيقات كما سيتم الشرح لاحقاً.

○ **المُبادل الحراري**: هو ذلك الجزء من النظام الذي يتم من خلاله تبادل الحرارة بين وسط التبريد الداخلي الزيت و وسط التبريد الخارجي هواء أو ماء وله عدة أنواع كالمُشعّ (**Radiator**) والذي يُستخدم عادة مع طريقة التبريد (**ONAN** أو **ONAF**)، والنوع الثاني هو المُبادل الحراري زيت/هواء (**Oil/Air heat exchanger**) و يُستخدم عادة مع طريقة التبريد (**OFAF** و **ODAF**)، و النوع الثالث المُبادل الحراري أو ما يُسمى بالمُبرد زيت/ماء (**Oil/Water heat exchanger** or **Cooler**) و يُستخدم عادة مع طريقة التبريد (**ODWF** و **OFWF**).

○ **المراوح**: تُستخدم للتدوير القسري (**Forced**) لوسط التبريد الخارجي الهواء ، بحيث يتم تركيبها مع المُشعّ (**Radiators**) في طريقة التبريد (**ONAF**) أو مع المُبادل الحراري زيت/هواء (**Oil/Air heat exchanger**) في طريقة التبريد (**OFAF** أو **ODAF**). وعادةً ما يتم التحكم بتشغيل و إطفاء هذه المراوح بأمر من مؤشر درجة حرارة الزيت (**OTI**) أو مؤشر درجة حرارة الملفات (**WTI**) أو عن طريق مُرّحل خاص وفقاً لحمل المحول فمثلاً لو زاد الحمل عن (70%) من الحمل الكلي يُصدر هذا المُرّحل إشارة عمل للمراوح والعكس صحيح.

○ **المضخة**: تُستخدم للتدوير القسري (**Forced**) لوسط التبريد الداخلي – الزيت - أو الخارجي – الماء -، بحيث يتم تركيبها مع المُشعّ (**Radiators**) في طريقة التبريد (**OFAF**) أو مع المُبادل

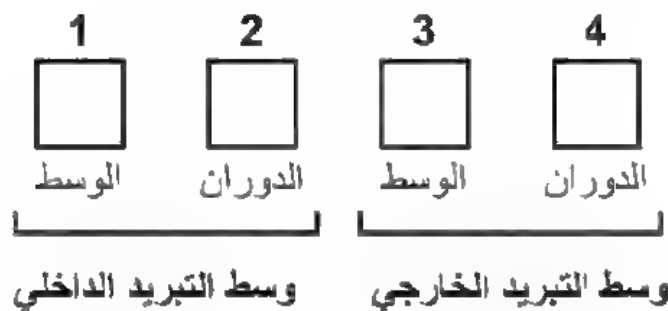
الحراري زيت/هواء (Oil/Air heat exchanger) في طريقة التبريد (OFAF أو ODAF) أو مع
المبادل الحراري زيت/ماء (Oil/Water heat exchanger) في طريقة التبريد (OFWF أو
(ODWF)



الشكل رقم (1-70)

• الترميز الخاص بطرق التبريد

بالرجوع إلى معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE) و اللجنة الكهروتقنية الدولية (IEC) فإن طريقة التبريد للمحولات الكهربائية يتم الإشارة لها برمز (Code) مُكوّن من أربعة حروف وفقاً للشرح الآتي بحيث يتم اختيار طريقة التبريد المناسبة للمحول بالإعتماد على نوع التطبيق المُستخدم فيه المحول بالإضافة إلى حجم المحول وكمية الحرارة المُراد تبديدها.



الجدول رقم (9-1)

الحرف الأول: ويُمَرَّز لوسط التبريد الداخلي للمحول والذي يكون على تماس مباشر مع الملفات		
O	زيت معدني أو إصطناعي ذو درجة حرارة نقطة إشتعال (Fire point) أقل أو تساوي 300° درجة مئوية.	وسط التبريد الداخلي
K	سائل عزل ذو درجة حرارة نقطة إشتعال (Fire point) أكثر من 300° درجة مئوية	
L	سائل عزل ذو درجة حرارة نقطة إشتعال (Fire point) لا يُمكن قياسها.	
الحرف الثاني: ويُمَرَّز لآلية تدوير وسط التبريد الداخلي للمحول		
N	يتم تدوير سائل التبريد بشكل طبيعي (Natural) دون الحاجة لمضخة وفقاً لظاهرة الحمل الطبيعي (Thermosiphon effect) لكل من جهاز التبريد - المُشع - و الملفات.	
F	يتم تدوير سائل التبريد بشكل قسري (Forced) داخل جهاز التبريد - المُشع - بإستخدام مضخة - زيت -، وبشكل طبيعي (Natural) في الملفات.	
D	يتم تدوير سائل التبريد بشكل قسري (Forced) داخل جهاز التبريد - المُشع - بإستخدام مضخة - زيت -، ويتم توجيه (Directed) الزيت الخارج من المُشع في الملفات.	
الحرف الثالث: ويُمَرَّز لوسط التبريد الخارجي للمحول		وسط التبريد الخارجي
A	هواء	
W	ماء	
الحرف الرابع: ويُمَرَّز لآلية تدوير وسط التبريد الخارجي للمحول		
N	يتم تدوير مائع التبريد بشكل طبيعي (Natural) دون الحاجة لمضخة - ماء - أو مراوح - هواء -.	
F	يتم تدوير مائع التبريد بشكل قسري (Forced) بإستخدام مضخة - ماء - أو مراوح - هواء -.	

ملحوظة (1-11): هنالك بعض أنواع التبريد الخاصة و تُستخدم مع المحولات المعزولة بالغاز مثل غاز سداسي فلوريد الكبريت (SF_6) وتكون على النحو التالي (GNAN و GDAN و GDWF و GDWF) حيث (G) يُقصد بها وسط العزل الداخلي للمحول وهو غاز ال (SF_6) و فيما يَخُص باقي الرموز يُمكن معرفتها بالرجوع للجدول (9-1) سابق الذكر.

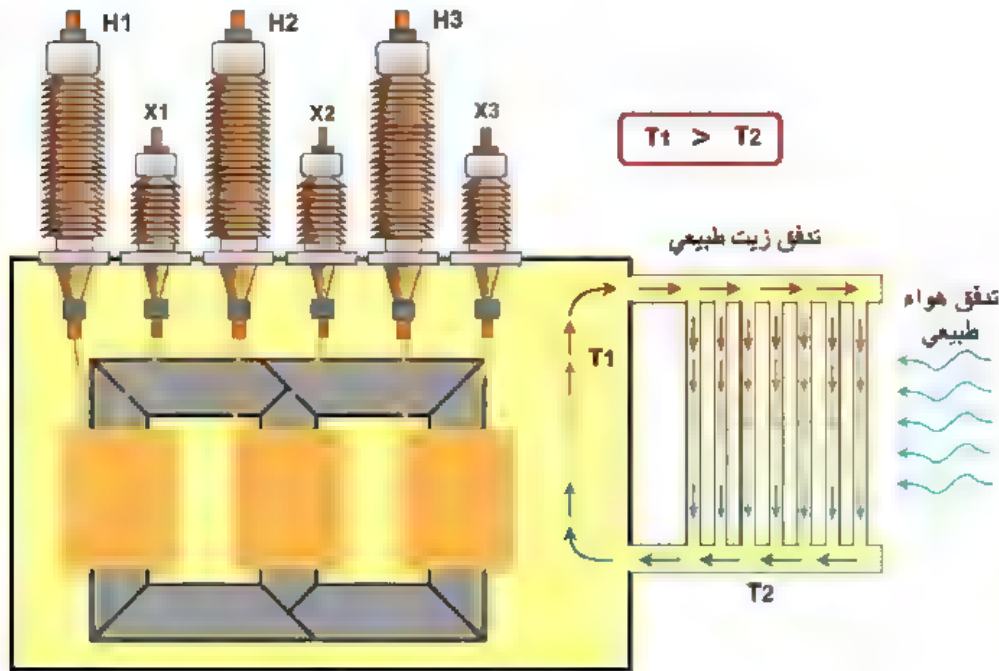


• طرق التبريد

إعتماداً على طريقة الترميم المذكورة أعلاه يُمكن إستخلاص وشرح آلية عمل أكثر طرق التبريد للمحولات شيوياً كالآتي:

○ طرق التبريد – ONAN و ONAF

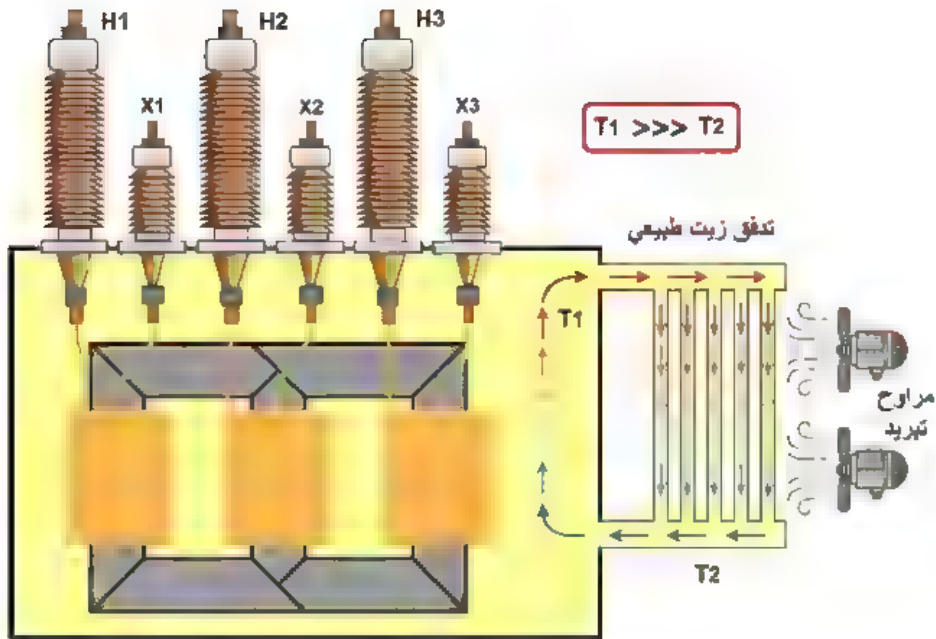
تُعتبر طريقة التبريد (Oil Natural Air Natural - ONAN) من أبسط طرق التبريد وأكثرها إنتشاراً حيث يتم التبريد نتيجة للدوران الطبيعي للزيت وفقاً لما يسمى بالـ (Thermosiphon effect) داخل المحول نتيجة لوجود فرق في درجة حرارة الزيت (ΔT) داخل خزان المحول (TI) و في المبادل الحراري – المشع (T2) كما يظهر بالشكل (1-71).



Oil Natural Air Natural - ONAN

الشكل رقم (1-71)

و بإضافة مراوح للمبادل الحراري – المشع - لتصبح طريقة التبريد (Oil Natural Air Forced - ONAF)، يزداد الفرق في درجة حرارة الزيت (ΔT) داخل خزان المحول (TI) و في المبادل الحراري – المشع (T2) وذلك نتيجة لإنخفاض درجة الحرارة (T2) مما يعني زيادة في معدل التدفق (Flow rate) أثناء الدوران الطبيعي للزيت وزيادة التبريد كما يُظهر في الشكل (1-72).

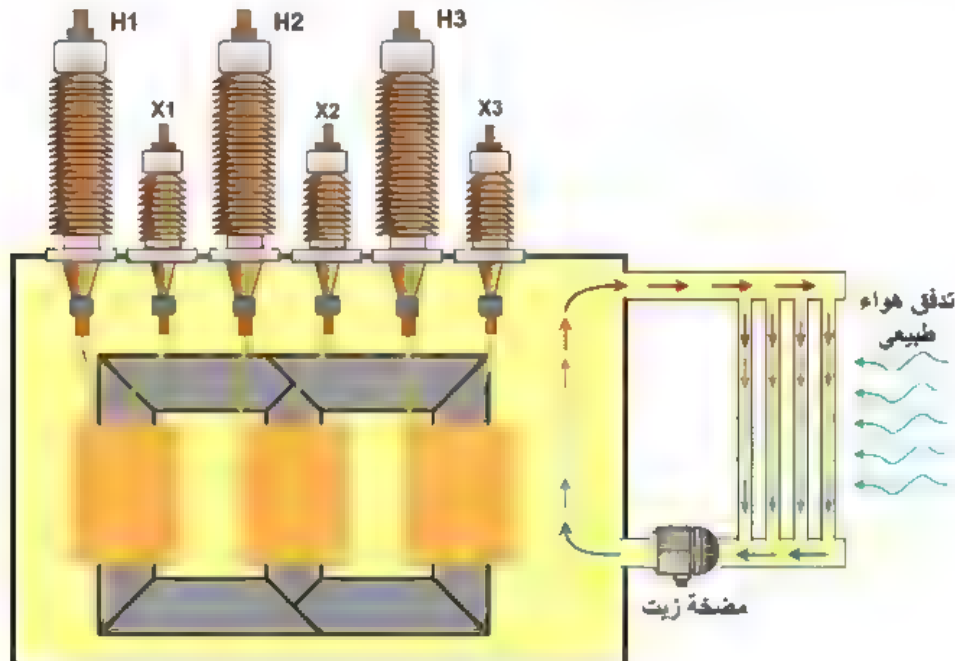


Oil Natural Air Forced - ONAF

الشكل رقم (1-72)

طرق التبريد - OFAN و OFAF و OFWF

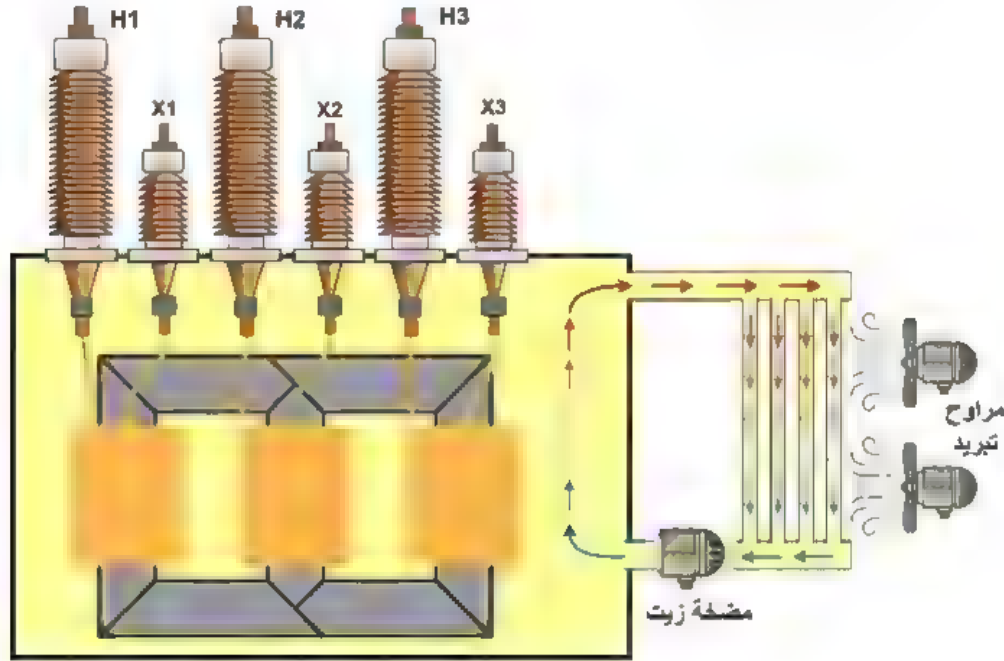
في هذه الطرق من التبريد يكون دوران الزيت داخل المحول قسري (Oil Forced - OF) عبر مضخات زيت مثبتة بين المبادل الحراري والخزان الرئيسي للمحول و يكون هذا الدوران غير موجه (Non-directed) كما هو موضح بالأشكال (1-73) و (1-74) و (1-75).



Oil Forced Air Natural - OFAN

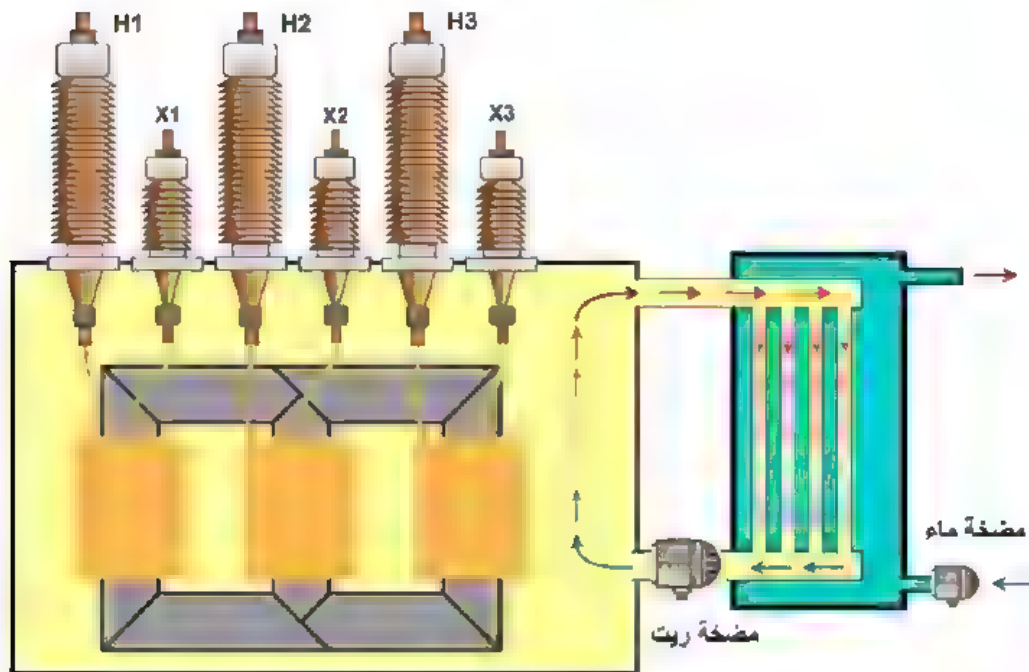
الشكل رقم (1-73)

أما فيما يخص وسط التبريد الخارجي فإما أن يكون هواء طبيعي (Air Natural - AN) كما هو مبين في الشكل (1-73)، أو هواء مدفوع بمراوح أي بشكل قسري (Air Forced - AF) كما هو مبين في الشكل (1-74)، أو ماء ذو دوران قسري (Water Forced - WF) كما هو مبين في الشكل (1-75) وذلك يعتمد على التطبيق المستخدم فيه هذا المحول.



Oil Forced Air Forced - OFAF

الشكل رقم (1-74)



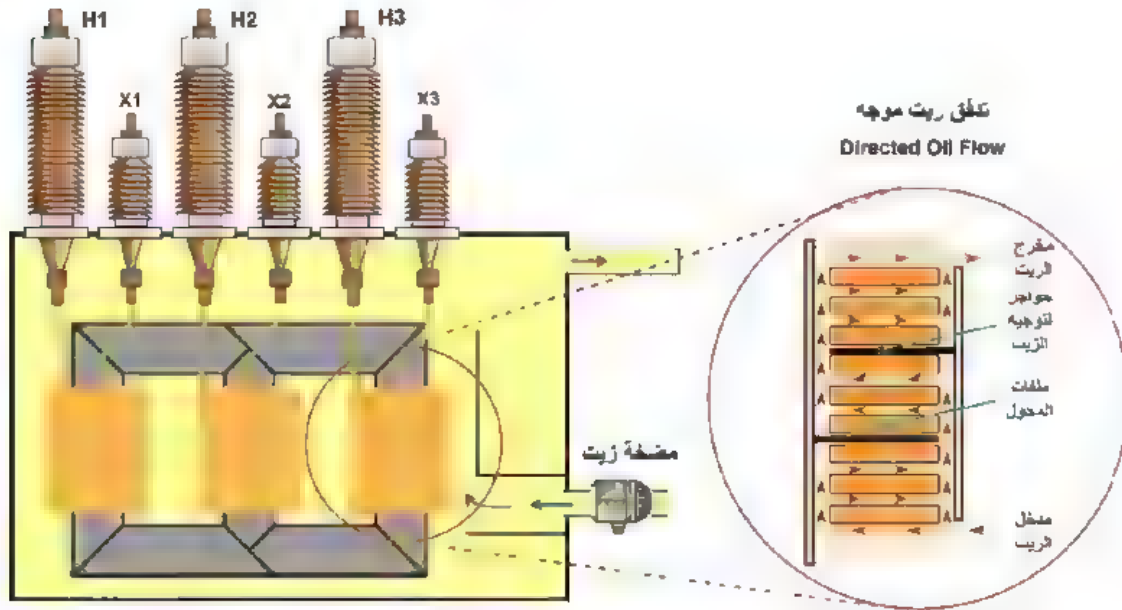
Oil Forced Water Forced - OFWF

الشكل رقم (1-75)

○ طرق التبريد – ODAN و ODAF و ODWF

في هذه الطرق من التبريد يكون دوران الزيت داخل المحول قسري (Oil Forced - OF) عبر مضخات زيت مثبتة بين المبادل الحراري والحزان الرئيسي للمحول و يكون هذا الدوران موجه (directed) على الملفات الرئيسية ضمن مسارات محددة لزيادة كفاءة التبادل الحراري بين الملفات وريث المحول كما هو موضح في الشكل (1-76).

أما فيما يخص وسط التبريد الخارجي فإما أن يكون هواء طبيعي (Air Natural - AN) أو هواء مدفوع بمراوح (قسري) (Air Forced - AF) أو ماء ذو دوران قسري (Water Forced - WF) وذلك يعتمد على التطبيق المستخدم فيه هذا المحول.



Oil Directed - ODXX

الشكل رقم (1-76)

● طرق التبريد وفقاً لقدرة المحول:

○ محولات القدرة الصغيرة (أقل من 50MVA)

مع هذا النوع من المحولات عادةً ما يتم استخدام طريقة التبريد (ONAN)، وتكمن حسنات هذه الطريقة في التبريد بأنها لا تحتاج إلى صيانة بالإضافة إلى عدم حاجتها إلى مصدر كهربائي إضافي (للمراوح مثلاً). كما وتبقى الفرصة متاحة لإضافة مراوح مستقبلاً إذا لزم الأمر.

○ محولات قدرة متوسطة (من 50MVA إلى 150MVA)

مع هذا النوع من المحولات عادةً ما يتم الجمع بين طريقتي التبريد (ONAN و ONAF) في المحول الواحد، بحيث يبدأ المحول عمله على طريقة التبريد (ONAN) ومن ثم نتيجة لإرتفاع حرارة زيت أو ملفات المحول

أو تحميل المحول فوق حد معين قد يكون من 70% إلى 80% من الحمل الكامل تعمل المراوح المثبتة على المبادل الحراري المُشع لينتقل المحول إلى طريقة التبريد (ONAF)

○ محولات قُدرة كبيرة (أكثر من 150MVA)

مع هذه المحولات إذا تم استخدام طريقة التبريد (ONAF) فإننا سنحتاج إلى مبادلات حرارية - مشع - ذو حجم كبير، لذلك وللتقليل من حجم هذه المبادلات يتم استخدام طرق التبريد (OFAF أو ODAF).

كما وتجدر الإشارة إلى أنه يُمكن الجمع بين أكثر من طريقة تبريد كما ذكر سابقاً، كمثال فإنه في المحولات الكبيرة عادة قد تكون طرق التبريد كالتالي:

- عندما يكون حمل المحول أقل أو يساوي 60% من الحمل الكامل تكون طريقة التبريد (ONAN).

- عندما يرتفع حمل المحول قرابة 60% إلى 80% من الحمل الكامل تكون طريقة التبريد (ONAF).

- عندما يرتفع حمل المحول أكثر من 80% من الحمل الكامل تكون طريقة التبريد (OFAF).

5.7 عوازل الإختراق أو الجُلْب - Bushings

تندرج عوازل الإختراق (Bushings) تحت مُسمى الـ (Hollow insulators) أي العوازل التي تُحوي تحويف

أطراف
الملفات
خارج
المحول

عوازل
الإختراق
أو الجُلْب

خزان
المحول

أطراف
الملفات

ملفات
المحول



الشكل رقم (1-77)

أو ممر للموصلات من خلالها، وتكمن وظيفتها في تأمين العزل اللازم للموصلات في حال تطلب الأمر مرور هذه الموصلات خلال حاجز ما (إختراقه). وتُعد المحولات من أهم التطبيقات التي تُوظف عوازل الإختراق (Bushings) للقيام بالمهمة سابقة الذكر، إذ يتطلب تصميم المحول أن يتم إخراج أطراف الملفات إلى خارج خزان المحول دون ملاصقة الخزان الخاص بالمحول لغابات ربط المحول بمعدات الشبكة الكهربائية كما يظهر بالشكل (1-77).

كما وتُجدر الإشارة إلى أن ما مقداره قرابة الـ (60%) بالمئة من عوازل الإختراق (Bushings) المُستخدمة عالمياً يتم توظيفها في المحولات الخارجية (Outdoor)

(transformers)، وما مقداره (20%) بالمئة تُستخدم في مُجمعات القضبان المعزولة بالغاز (Gas Insulated Switchgears - GIS)، وما مقداره (10%) بالمئة في المولدات (Generators)، وما مقداره أقل من (10%) بالمئة تكون على الجدران (Walls) أو لغايات الفحص.

ويتم إختيار عوازل الإختراق (Bushings) وفقاً لمستوى الفولتية بالإضافة إلى مستوى التيار بشكل أساسي بالإضافة إلى البيئة التشغيلية المحيطة و أي إعتبارات أخرى مثل حجم محولات التيار المراد إستخدامها

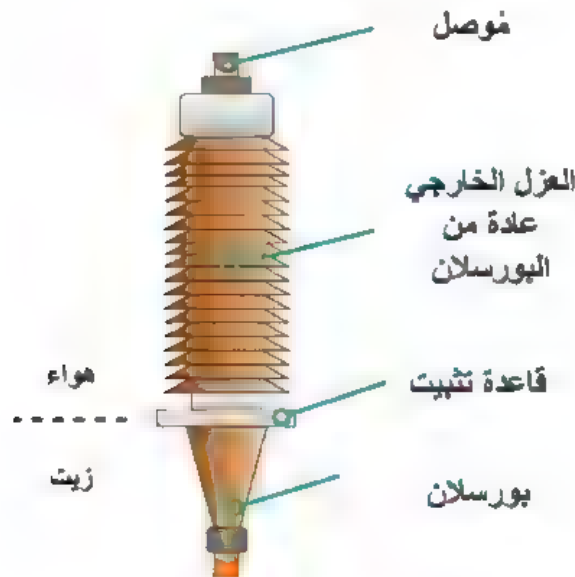
• أنواع عوازل الإختراق / جُلَب المحولات

يُمكن تصنيف عوازل الإختراق (Bushings) وفقاً لعدة أوجه منها ما هو حسب نوع الوسط العازل الخارجي عند طرفي عازل الإختراق ومنها ما هو تركيبي ومنها ما هو حسب نوع المادة العازلة داخل عازل الإختراق كالآتي:

○ حسب نوع الوسط العازل الخارجي عند طرفي عازل الإختراق - Insulating Media on Ends

يَعتمد هذا التصنيف على نوع التطبيق (Application) أو نوع المُعدّة المُستخدم فيه عازل الإختراق، بحيث تُصنّف وفقاً لنوع الوسط العازل الخارجي عند طرفيه إلى الآتي:

- عوازل إختراق هواء - زيت (Air to Oil Bushings): في هذا النوع يكون أحد طرفي عازل الإختراق في الهواء و يكون الطرف الآخر مغمور بالزيت كما هو الحال في المحولات المغمورة بالزيت وغيرها من المُعدات المغمورة بالزيت كالقواطع و المُفاعلات الحثية (Reactors) والمُبين في الشكل (1-78).

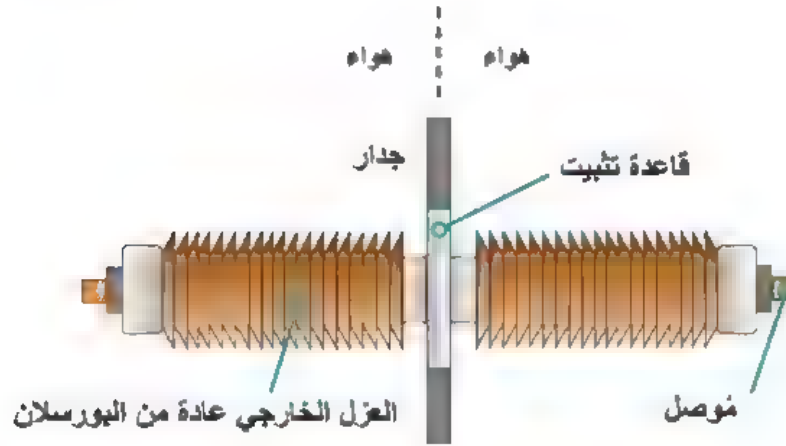


الشكل رقم (1-78)



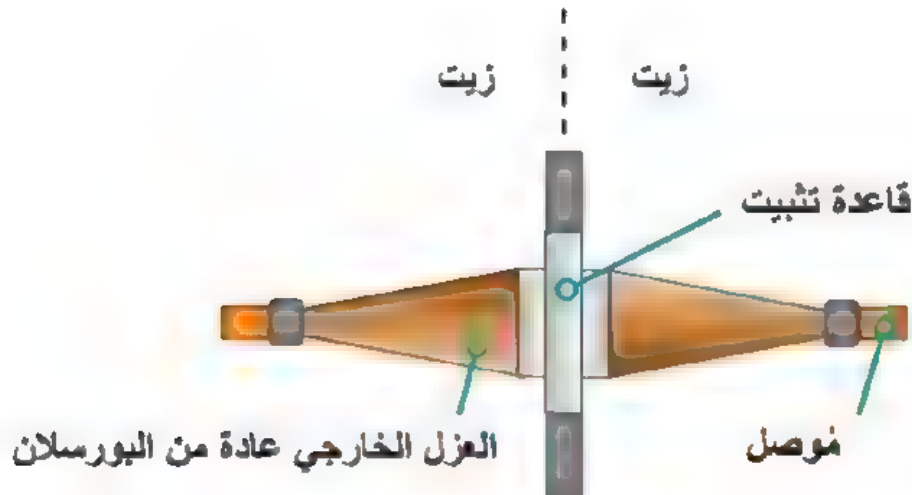
ملحوظة (1-12): كما يظهر بالشكل (1-78) أن طول عازل الإختراق الموحود بالزيت قُرابة نصف طول العازل الموجود بالهواء أو أقل، و يعود ذلك إلى أن قوة العزل (Dielectric strength) للزيت أكبر الضعف من نظيرتها للهواء الخارجي.

■ عوازل إختراق هواء – هواء (Air to Air Bushings): في هذا النوع يكون طرفي عازل الإختراق في الهواء، وعادة ما يتم إستخدامه لتمرير موصل خارج المبنى بحيث يكون أحد أطراف عازل الإختراق في الهواء الداخلي للمبنى والآخر في الهواء الخارجي كما هو مبين في الشكل (1-79).



الشكل رقم (1-79)

■ أنواع خاصة أخرى من عوازل الإختراق ويندرج تحتها (Air to SF6 bushings) و (Oil to SF6 bushings) و (Oil to Oil bushings).



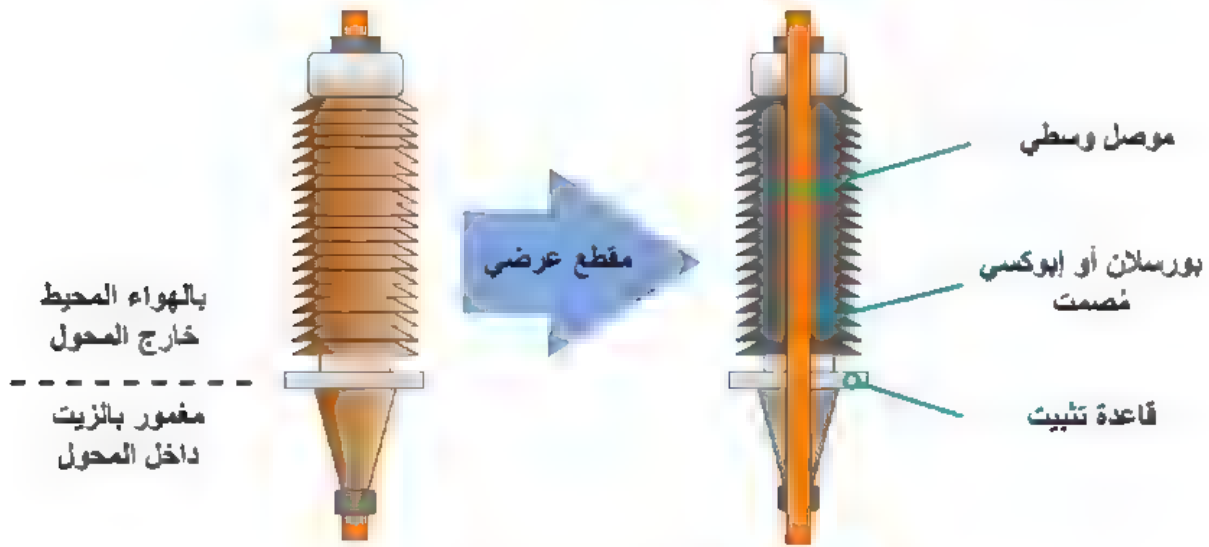
الشكل رقم (1-80)

○ حسب تركيب عازل الإختراق - Bushing Construction

تُصنف عوارل الإختراق (Bushings) وفقاً للتركيب إلى نوعين رئيسيين وهما:

■ عوازل الإختراق الصلبة - Solid or Ungraded Bushings:

يُعد هذا النوع من أبسط الأنواع حيث أنه يتكون من عازل أحوف من المورسلان أو الإيوكسي ويمكن أن يتوسطه موصل كهربائي كخُرء من عازل الإختراق (Bushing) كما هو مبين في الشكل (1-81)، و يُمكن أن يكون العازل لوحده دون الموصل. ويُستخدم هذا النوع بشكل رئيسي للتطبيقات ذات الفولتية المنخفضة أي أقل من (25 kV) كيلوفولت.

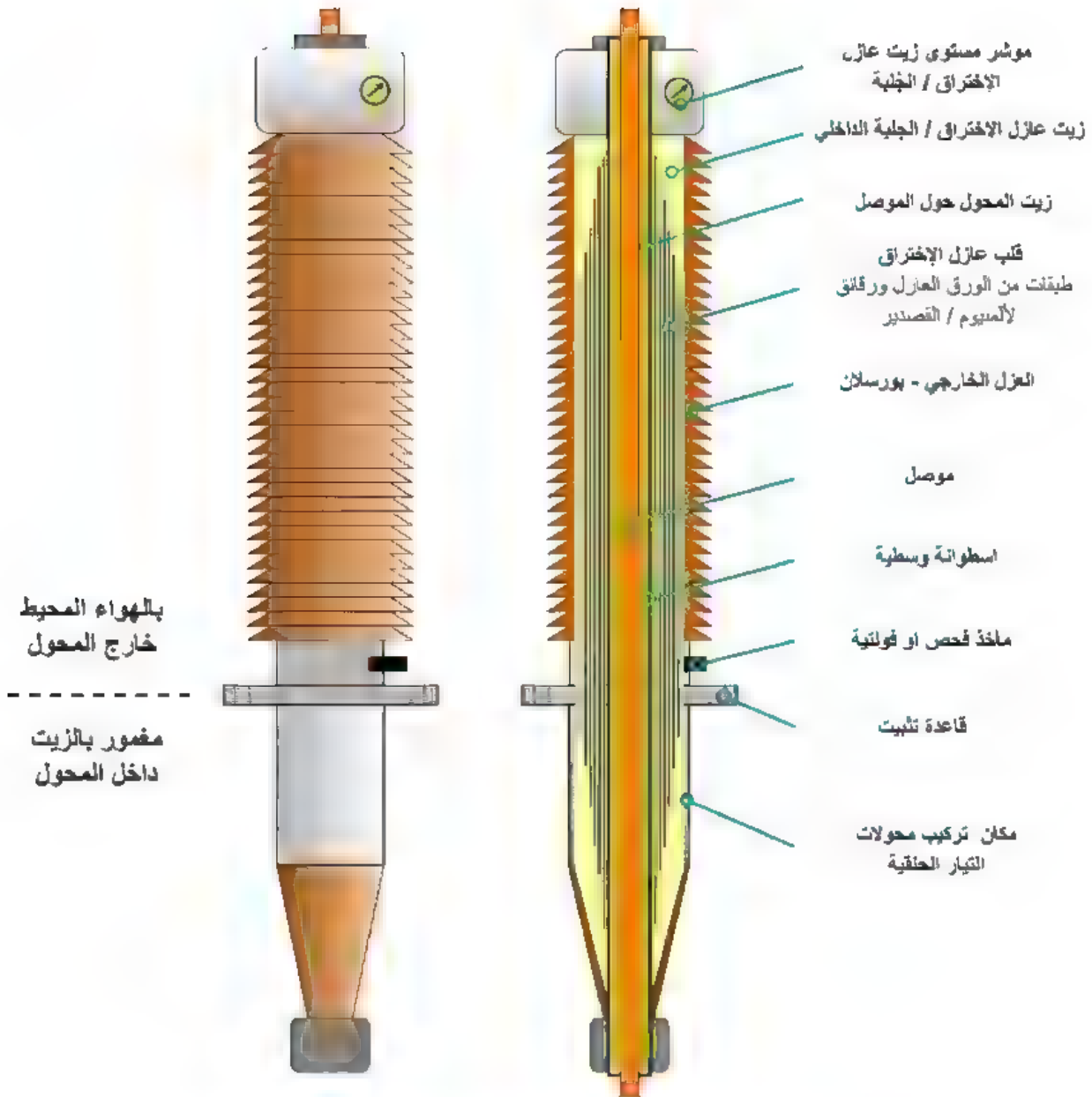


Solid or Ungraded Bushing

الشكل رقم (1-81)

■ عوازل الإختراق ذات العزل السعوي المُتدرج - Capacitive Graded Bushing:

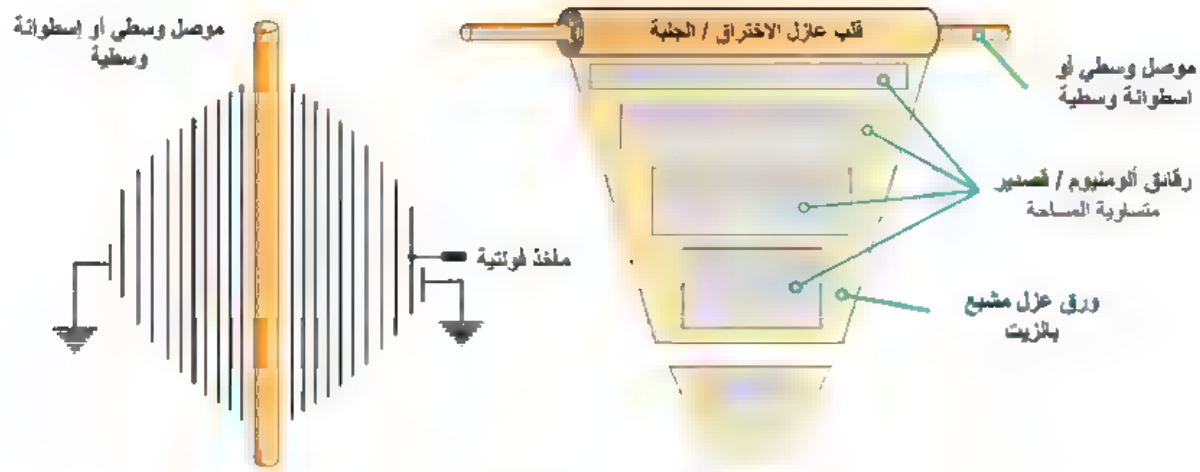
مع تطور النظام الكهربائي عبر الزمن وما صاحبه من إرتفاع في مستوى الفولتية كان لا بُد من إيجاد بديل للعوارل الإختراق الصلبة (Solid/Ungraded Bushings) سابقة الذكر و ذلك لعدم قدرتها على تحمل الفولتيات المرتفعة، وهذا بدوره أدى لظهور ما يُسمى بعوازل الإختراق ذات العزل السعوي المُتدرج (Capacitive Graded Bushings) لما لهذا النوع من قدرة على توزيع المجال الكهربائي خارج عازل الإختراق بشكل أفضل من نظيرتها الصلبة التقليدية (Solid / Ungraded) خاصة للفولتيات الأكبر من (25kV) كيلوفولت.



Capacitive Graded Oil Impregnated Paper (OIP) Bushing

الشكل رقم (1-82)

حيث يتكون هذا النوع من عوازل الإختراق (Bushings) من موصل وسطي (Central conductor) أو إسطوانة وسطية (Central Tube) يتم لفها من الخارج بورق عزل مُشبع بالزيت (Oil Impregnated Paper - OIP) كما هو مبين بالشكل (1-82) أو مُشبع بالراتنج أو الصمغ (Resin Impregnated Paper - RIP) كما هو مبين بالشكل (1-88)، بحيث يكون الوجه الداخلي لورق العزل عبارة عن رقائق الألمنيوم أو ما يُسمى بالقصدير (Aluminum foil) كما هو موضح بالشكل (1-83)، مما يؤدي لتكوّن مجموعة من المواسعات الموصولة على التوالي والتي من شأنها التحكم وتوزيع المجال الكهربائي المحوري (Axial Electrical Field) و الشعاعي/القُطري (Radial Electrical Field).



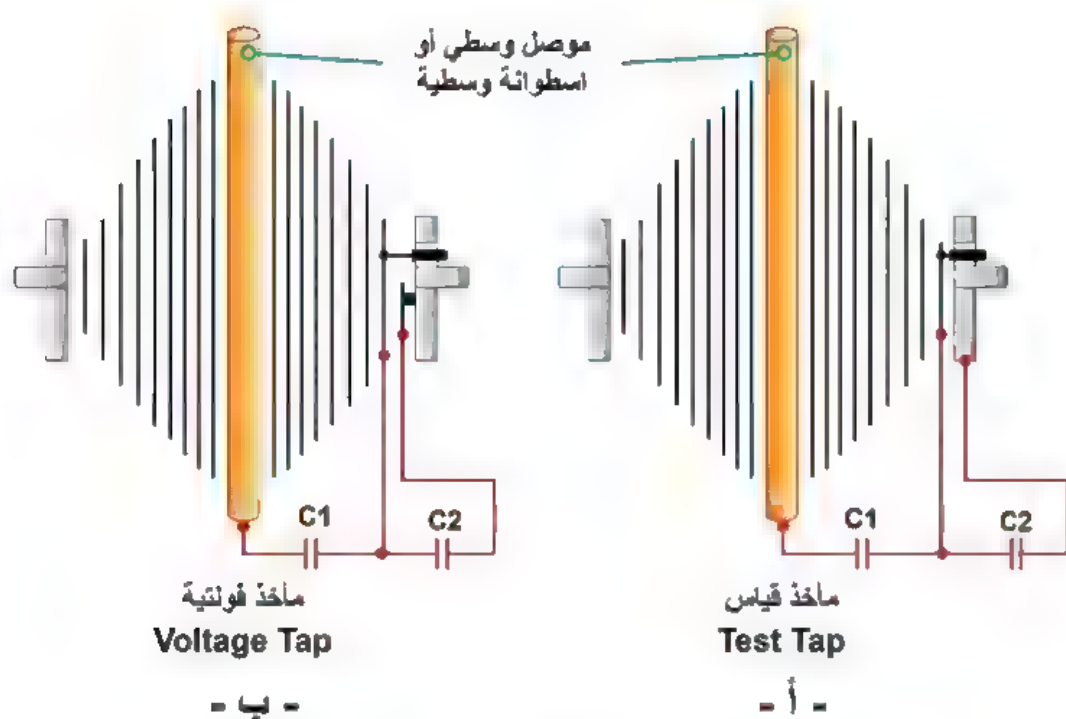
الشكل رقم (1-83)

و يتميز هذا النوع بوجود نوعان من المآخذ (Taps) موجودة عند قاعدة تثبيت عازل الإختراق (Mounting flange) من الخارج، النوع الأول وهو مأخذ الفحص (Test Tap) ويكون مُخصص لإجراء الفحوصات على عازل الإختراق (Bushing) كفحوصات معامل التبدد و القدرة (DF & PF) و فحص المواسعة (C) وفحص التفريغ الجزئي (PD)، حيث يتكون هذا المآخذ من عطاء مسنن (Threaded cover) يكون تحته مسمار (Pin) متصل بأخر طبقة ألومنيوم/قصدير (Aluminum foil) داخل عازل الإختراق (Bushing)، بحيث يُشار إلى قيمة المواسعة بين المسمار (Pin) الخاص بهذا المآخذ (Test tap) و الموصل الوسطي (Central Conductor) أو الإسطوانة الوسطية (Central Tube) بالمواسعة رقم واحد (C1)، ويُشار إلى قيمة المواسعة بين المسمار (Pin) الخاص بهذا المآخذ (Test tap) و قاعدة التثبيت (Mounting flange) أو الأرضي بالمواسعة رقم إثنان (C2) كما هو مبين في الشكل (1-84) (أ)، وتكون قيمة هاتين المواسعتين مثبتة على لوحة البيانات (Name plate) الخاصة بعازل الإختراق لغايات المقارنة عند الفحص.

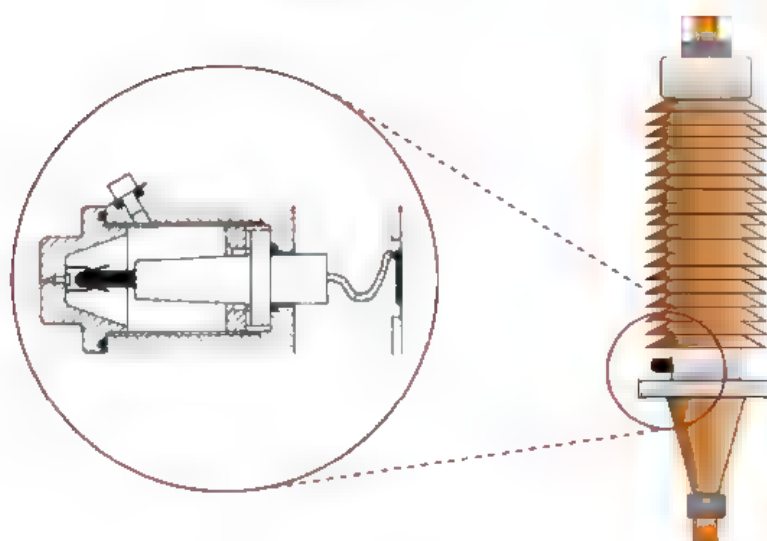
و تكون وظيفة عطاء المآخذ المُسنن (Threaded cover) سابق الذكر هو تأمين التأريض اللارم لآخر طبقة ألومنيوم/قصدير (Aluminum foil) في حال كان عازل الإختراق (Bushing) في الخدمة أي أنه تحت تأثير الفولتية، أما في حال كان عازل الإختراق (Bushing) خارج الخدمة أي أنه مفصول عن مصدر الفولتية و لغايات الفحص يتم إزالة هذا الغطاء ليُصبح المسمار (Pin) غير مؤرض، وتتم عملية الفحص لإستخراج قيمة المواسعة (C1) و التي تُعطي إنطباع عن حالة عازل الإختراق (Bushing) الداخلية.

أما فيما يخص النوع الثاني من المآخذ وهو مأخذ الفولتية (Voltage/Potential Tap) المبين في الشكل (1-84) (ب) فإنه عادة ما يتم إستخدامه لعوازل الإختراق (Bushings) ذات الفولتيات المرتفعة (أكبر من 69 كيلوفولت) و تكمن وظيفته في تأمين مأخذ فحص كما هو الحال في المآخذ سابق الذكر (Test Tap) بالإضافة إلى تأمين مصدر فولتية للمعدات المساعدة إن وجدت.

كما وتجدر الإشارة إلى أن المواسعة (C1) عادة ما تكون متقاربة بالقيمة مع المواسعة (C2) لمآخذ الفحص (Test Tap)، أما فيما يخص مأخذ الفولتية (Voltage/Potential Tap) فإن قيمة المواسعة (C1) تكون أقل بكثير من المواسعة (C2).



الشكل رقم (1-84)



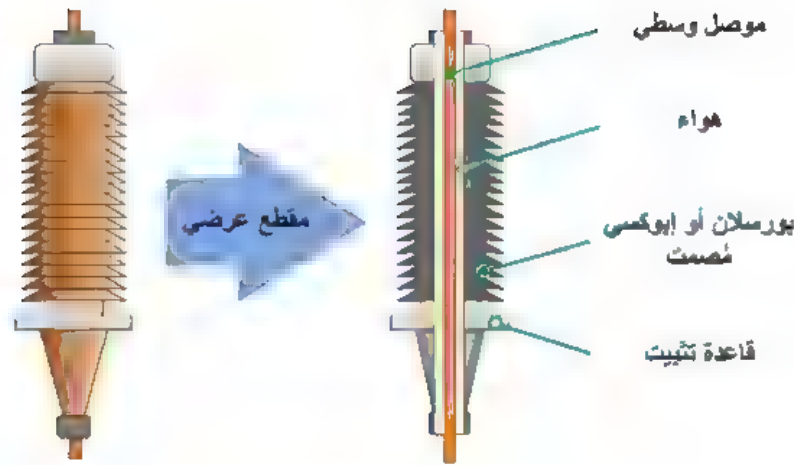
الشكل رقم (1-85)

○ حسب نوع المادة العازلة داخل عازل الإختراق - Bushing inside insulation

تُصنف عوارل الإختراق (Bushings) وفقاً لنوع المادة العازلة إلى الأنواع التالية:

▪ عوارل الإختراق المعزولة بالهواء - Air Insulated Bushings

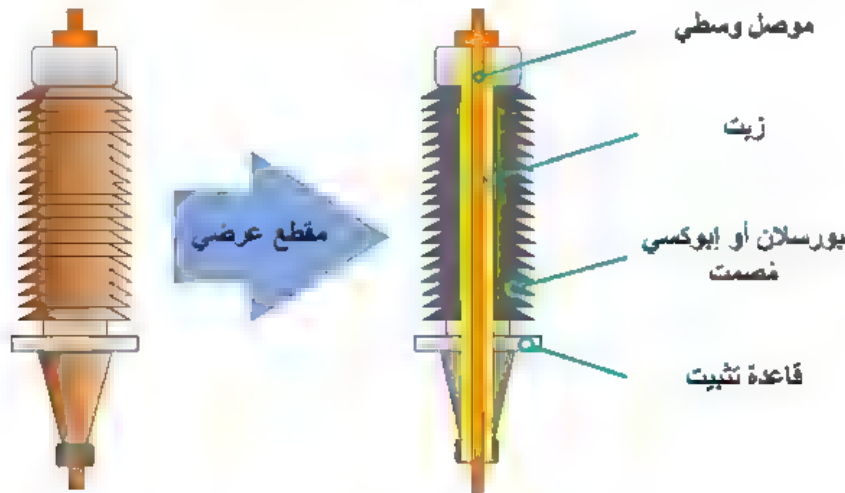
وهي إحدى أنواع عوارل الإختراق الصلبة (Solid/Unguarded Bushings) حيث يكون الهواء هو الوسط العازل الداخلي بين الموصل (Conductor) والعازل الخارجي، وعادة ما يكون هذا العزل الخارجي مُكون من مادة البورسلان كما هو مبين في الشكل (1-86).



الشكل رقم (1-86)

■ عوازل الإختراق المعزولة بالزيت أو المملوءة بالزيت - Oil Insulated or Oil Filled Bushings

وهي إحدى أنواع عوازل الإختراق الصلبة (Solid/Unggraded Bushings) حيث يكون الزيت المعدني هو الوسط العازل الداخلي بين الموصل (Conductor) و العازل الخارجي، وعادة ما يكون هذا العزل الخارجي مُكوّن من مادة البورسلان كما هو مبين في الشكل (1-87).



الشكل رقم (1-87)

■ عوازل الإختراق ذات العزل المُتدرّج المُشبع بالزيت - Oil Impregnated Paper Bushings OIP

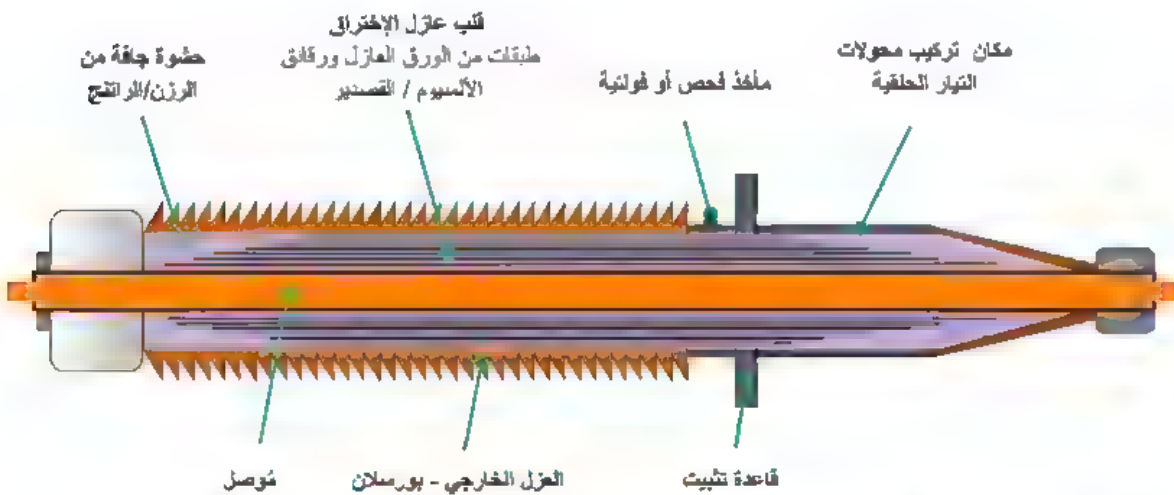
وهي إحدى أنواع عوازل الإختراق ذات العزل المُتدرّج (Graded Bushings) حيث يكون ورق العزل الموجود داخله مُشبع بالزيت، ويتم ملئ الفراغ بين العزل الداخلي (OIP) أو ما يُسمى بقلب عازل الإختراق والعزل الخارجي لعازل الإختراق والمُكوّن عادة من البورسلان بالزيت المعدني كما هو موضح في الشكل (1-82). ويُعد هذا النوع من أكثر الأنواع إنتشاراً في محولات القدرة ذات الفولتية المرتفعة.

ومن مميزات هذا النوع هو سعره المنخفض نسبياً وإمكانية فحص الزيت الخاص به للكشف عن حالة عازل الإختراق، و من سيئاته هو إمكانية الانفجار والتسبب بحريق للمحول وكذلك إمكانية حدوث تسريب للزيت بالإضافة إلى الحاجة للتخزين بوضعية مُعَيَّنة (شكل عامودي أو مائل براوية معينة).

■ عوازل إختراق ذات العزل المُتدرّج المُشبع بالراتنج/الصمغ – Resin Impregnated Paper Bushings RIP

وهي إحدى أنواع عوارل الإختراق ذات العزل المُتدرّج (Graded Bushings) حيث يكون ورق العزل الموجود داخله مُشبع بالراتنج أو الصمغ (Resin)، ويتم ملئ الفراغ بين العزل الداخلي (RIP) أو ما يُسمى بقلب الإختراق والعزل الخارجي لعازل الإختراق والمُكوّن عادة من البورسلان بمادة عزل جافة أو غيرها من المواد العازلة كما هو موضح في الشكل (1-88).

ومن مميزات هذا النوع أنه ذو قلب (RIP) غير قابل للإشتعال على العكس من النوع (OIP) سابق الذكر، وكذلك ذو مستوى تفريغ جريئي (Partial discharge) منخفض مما يتيح استخدامه في التطبيقات ذات الفولتية المرتفعة، ومن سيئاته سعره المرتفع نسبياً.



Capacitive Graded Resin Impregnated Paper (RIP) Bushing

الشكل رقم (1-88)

■ عوازل الإختراق ذات القلب المُكون من طبقات من الورق والراتنج - Resin Bonded Bushings RBP

حيث يتكون هذا النوع من عوازل الإختراق (Bushings) من موصل وسطي (Central conductor) أو إسطوانة وسطية (Central Tube) يتم لفها من الخارج بورق عزل بحيث يكون الوجه الداخلي لورق العزل مُغطى بطبقة رقيقة من الراتنج (Epoxy resin) ويتخللها مادة شبه موصلة مثل العرافيت (Graphite) أو الكربون (Carbon) بهدف عمل تدرّج للمجال الكهربائي الناتج عن الموصل الوسطي، ويتم ملئ الفراغ بين العزل الداخلي (RBP) أو ما يُسمى بقلب عازل

الإختراق والعزل الخارجي لعازل الإختراق والمُكوّن عادة من البورسلان من الزيت أو الفوم (Foam).
و تُجدر الإشارة إلى أن هذا النوع تم التوقف عن تصنيعه حالياً.

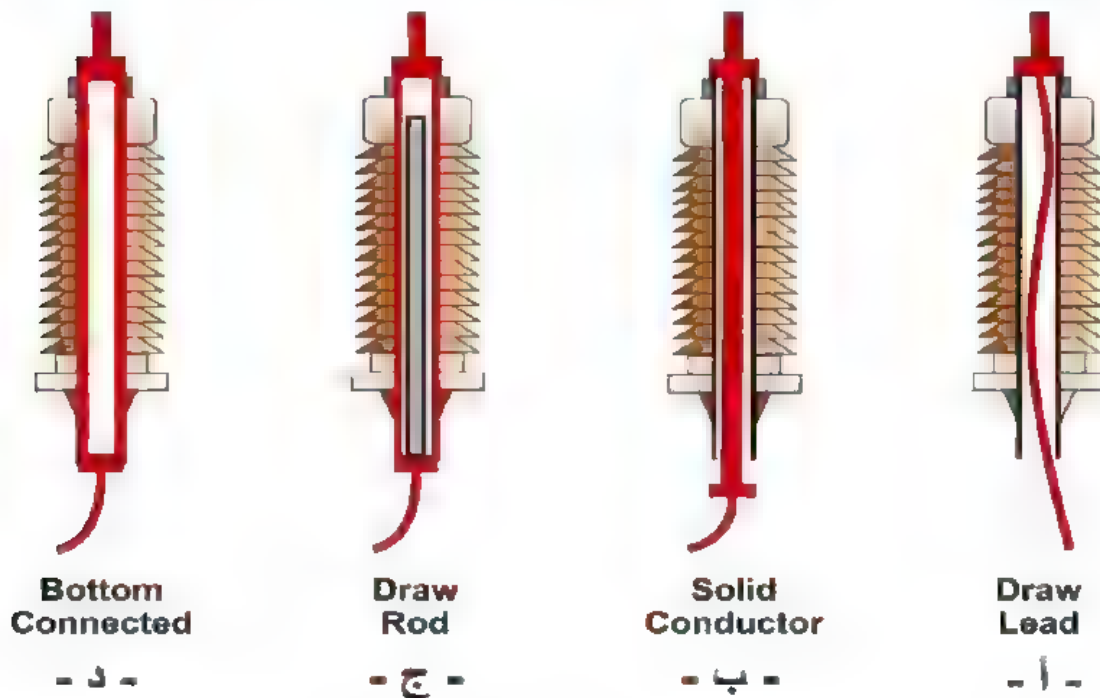
ومن مميزات هذا النوع هو أنه ذو قلب (RBP) غير قابل للإشتعال على العكس من النوع (OIP) و
ذو سعر منخفض نسبياً، و من سيئاته أنه ذو مستوى تفريغ جزئي (Partial discharge) مرتفع
نوعاً ما مما لا يُتيح إستخدامه في التطبيقات ذات الفولتية المرتفعة الأكثر من (400 kV) كيلوفولت
وكذلك إمكانية دخول الماء للقلب في حال التخزين الخاطئ.

■ عوازل الإختراق المعزولة بالغاز – Gas Insulated Bushings

في هذا النوع من عوازل الإختراق يكون الغاز المضغوط – عادة غاز سداسي فلوريد الكبريت SF_6 -
هو الوسط العازل بين الموصل الوسطي (Central conductor) و العزل الخارجي والمُكوّن عادة
من البورسلان أو المطاط.

• أنواع توصيلات عوازل إختراق المحولات

هناك أربعة أنواع رئيسية للتوصيلات الخاصة بعوازل إختراق المحولات (Bushings) كما هو مبين
بالشكل (89-1)، حيث يُمثل اللون الأحمر مسار التيار داخل عازل الإختراق.



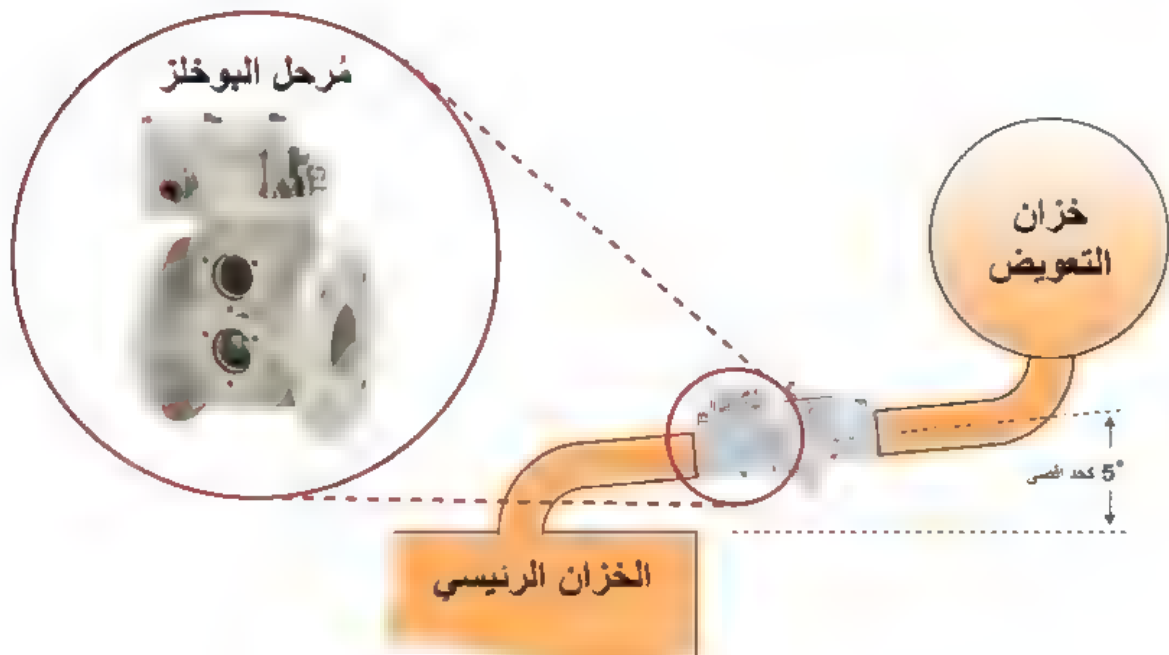
الشكل رقم (89-1)

5.8 مُعدات المراقبة والحماية الفيزيائية المساعدة – Monitoring and Physical Protection Accessories

هناك العديد من المُعدات المساعدة التي يتم تركيبها على المحول بهدف المراقبة بالإضافة إلى تأمين الحماية اللازمة في حال حدوث أعطال وهي كالآتي:

• مُرخل البُوخلز – Buchholz relay

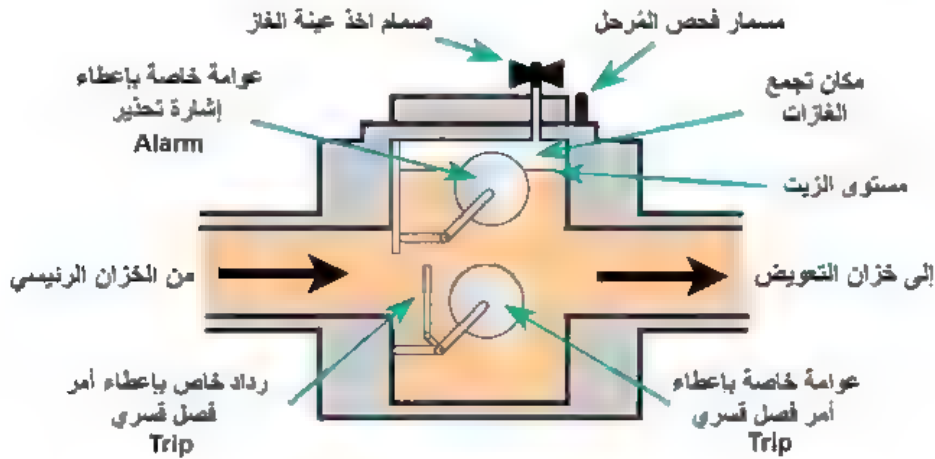
عادة ما يتم استخدامه للمحولات ذات السعة الأكبر من (500kVA) كيلو فولت أمبير لأسباب إقتصادية، ويتم تركيب هذا المرحل على أنبوب الزيت الرئيسي الواصل بين حزان التعويض (Conservator tank) و الخزان الرئيسي للمحول (Main tank) أو حجرة مُغيّر الخطوة من نوع (OLTC) كما هو مبين بالشكل (1-90).



الشكل رقم (1-90)

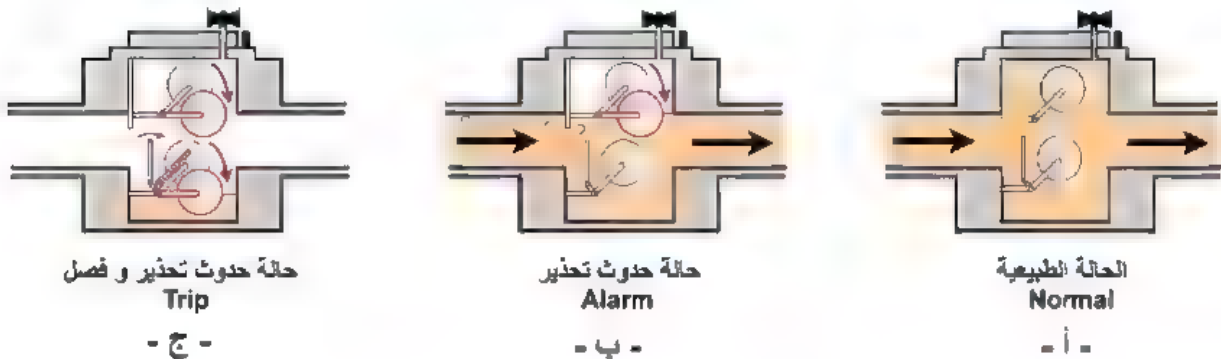
كما هو معلوم أن أغلب الأعطال الداخلية في المحول تؤدي لظهور نقاط إحماء في الملفات أو القلب الحديدي ونتيجة لهذا الإحماء سوف تنتج مجموعة من الغازات والتي سوف تصعد لأعلى نقطة في المحول وهو خزان التعويض (Conservator tank) مروراً بمرحل البوخلز، وهنا تكمن وظيفة مُرخل البوخلز وهي بتجميع هذه الغازات في حُجرة أعلى المرحل كما يظهر بالشكل (1-91)، مما يؤدي إلى انخفاض مستوى الزيت ونزول العوامة (Float) العلوية مُصدرة إشارة تحذير (Alarm) لا تؤدي إلى فصل المحول، ويُقدّر حجم هذه الحجرة من (100ml - 300ml) مليلتر.

أما فيما يخص العوامة السفلية فإنها تعمل في حالة إنخفاض مستوى زيت المحول نتيجة لوجود تسريب زيت مما يؤدي لنزول العوامة العلوية مصدرة إشارة تحذير (Alarm) ومن ثم العوامة السفلية مُصدرة أمر فصل قسري للمحول (Trip).



الشكل رقم (1-91)

وفي حال حدوث عطل كبير (خطر) داخل المحول أدى لإرتفاع الضغط فإن الزيت الموجود في الخزان الرئيسي سوف يبدأ بالحركة السريعة باتجاه خزان التعويض (Conservator tank) مروراً بمرحل البوخلز مؤدياً إلى تحريك الرداد المثبت على العوامة السفلية وإصدار أمر فصل قسري للمحول (Trip) وهذا ما يُسمى بال(Oil surge)، حيث أن هذا الرداد يتحرك في حال كانت سرعة تدفق الزيت إلى خزان التعويض من (1m/s - 3m/s) متر/ثانية أو أكبر من ذلك.



الشكل رقم (1-92)

الشكل [(1-92) (ب)] يوضح حركة العوامة العلوية لمرحل البوخلز في حال تجمع الغازات مما يؤدي لإصدار إشارة تحذير (Alarm) فقط، و الشكل [(1-92) (ج)] يوضح حركة العوامة العلوية والسفلية في حال حدوث تسريب للزيت من الخزان الرئيسي ونزول مستوى الزيت مما يؤدي لإصدار إشارة تحذير (Alarm) وأمر فصل قسري للمحول (Trip).

في حال تفاعل مرحل البوخلز وإصدار إشارة التحذير (Alarm) يُمكن أخذ عينة من الغازات المُتجمعة في المرهل بواسطة الصمام المبين في الشكل (1-91) وتحليل هذه الغازات لمعرفة التركيب الكيميائي ومنه يتم

معرفة نوع العطل الداخلي في المحول، كما ويُمكن فحص عينة الغاز بطرق بسيطة كالنظر و الشم و الحرق المباشر وفقاً للجدول (1-10) الآتي كما ورد في كتاب [المحولات الكهربائية، الجزء الأول، الدكتور كاميليا محمد]

الجدول رقم (1-10)

حالة الغازات	مصدر العطل
عديم اللون والرائحة وغير قابل للإشتعال	وجود هواء داخل المحول - أقل خطراً وقد يكون السبب تسرب بعض الهواء للمحول أثناء معالجة الزيت
عديم اللون والرائحة وقابل للإشتعال	عطل داخل المحول
أبيض او رمادي	ورق العزل
أصفر	أجزاء خشبية
أسود	زيت

ملحوظة (1-13): يتم تصميم الأنبوب الحامل لمُرَحَل البوخلز بشكل أفقي مع وجود ميلان بزاوية صغيرة (1° إلى 5°) درجات عن الخط الأفقي وذلك لمساعدة فقاعات الغاز على الانتقال من الخزان الرئيسي والوصول لمُرَحَل البوخلز وعدم تكوّن جيوب غازية في الأنبوب مما يحول دون وصول هذه الغازات إلى مُرَحَل البوخلز.



• صمام الإغلاق الذاتي - Auto-shutoff Valve

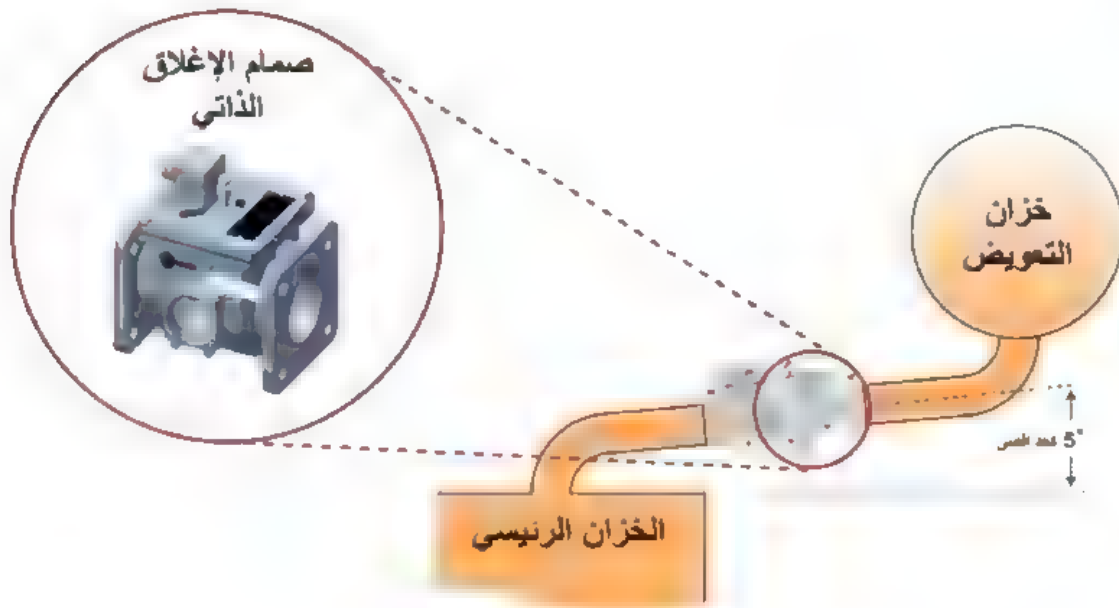
في وضع التشغيل الطبيعي للمحول يكون إتجاه تدفق الزيت بين خزان التعويض (Conservator) والخزان الرئيسي (Main tank) بالإتجاهين نتيجة لتمدد وتقلص الزيت مع الحرارة، ففي حالة تقلص حجم الزيت نتيجة لإنخفاض حمل المحول أو إنخفاض درجة حرارة البيئة المحيطة يتدفق الزيت من خزان التعويض بإتجاه الخزان الرئيسي، أما في حال إزداد حجم الزيت نتيجة لزيادة حمل المحول أو إزداد درجة حرارة البيئة المحيطة يتدفق الزيت من الخزان الرئيسي بإتجاه خزان التعويض، وتكون سرعة التدفق في الأوضاع الطبيعية سابقة الذكر منخفضة نسبياً.

أما في الأوضاع غير الطبيعية فهناك احتمالين:

الإحتمال الأول: حدوث عطل داخلي أدى لإرتفاع الضغط داخل الخزان الرئيسي و تدفق الزيت بسرعة من الخزان الرئيسي بإتجاه خزان التعويض، وفي هذه الحالة يتولى مُرَحَل البوخلز مهمة حماية المحول و إصدار أمر الفصل القسري للمحول (Trip) كما تم شرحه مسبقاً.

الإحتمال الثاني: حدوث تسريب زيت كبير من الخزان الرئيسي أدى لتدفق الزيت بشكل سريع من خزان التعويض بإتجاه الخزان الرئيسي، وفي هذه الحالة يتولى صمام الإغلاق الذاتي (Auto-shutoff Valve)

أو ما يُسمى بالـ (Shutter Valve) مهمة حماية المحول و ذلك بالإغلاق و إصدار أمر فصل قسري للمحول (Trip).



الشكل رقم (1-93)

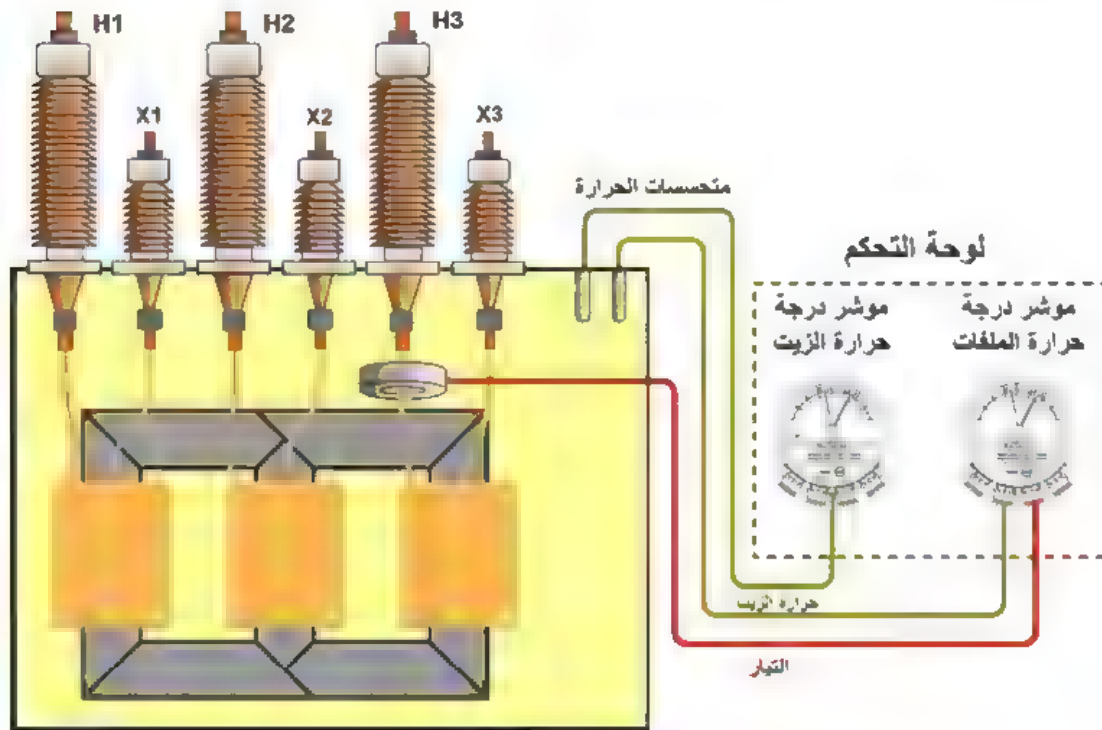
عادة ما يتم تركيب صمام الإغلاق الذاتي على الأنبوب الرئيسي الواصل بين خزان التعويض والخزان الرئيسي إلى جانب مرحل البوخلز كما هو مبين في الشكل (1-93)، ويتكون هذا الصمام من حجتين للريت وعندما يتحسس حدوث فرق في الضغط بين الحجتين نتيجة لسرعة تدفق الزيت باتجاه الخزان الرئيسي يقوم بالإغلاق و إصدار أمر الفصل القسري للمحول (Trip) كما ذكر سابقاً حيث أن العوامة (Float) الخاصة بهذا الصمام تتحرك في حال كانت سرعة تدفق الزيت أكثر من $(30 \text{ dm}^3/\text{min})$ ديسي متر مكعب / دقيقة.

ويكمن الهدف الرئيسي من إغلاق الصمام أنه في حال وجود تسريب زيت كبير من الخزان الرئيسي قد يؤدي إلى إستنزاف كامل كمية الزيت من خزان التعويض مما يعني وصول الهواء إلى الخزان الداخلي مما يزيد احتمالية حدوث قوس كهربائي ولذلك فإن إغلاق الصمام و فصل المحول تُعد أكثر الحلول نجاعة في هذه الحالة.

• مؤشر حرارة الزيت – Oil Temperature Indicator OTI

كما ذكر سابقاً فإن أغلب الأعطال الداخلية للمحول عادة ما تُنتج حرارة لذلك يتم تركيب هذا المؤشر لمراقبة حرارة الزيت أثناء عمل المحول، وتتكون هذه المُعدة من حساس حرارة لتحسس حرارة الزيت بشكل مباشر ويتم تركيبه في أعلى نقطة من الخزان الرئيسي للمحول ويكون موصول بمؤشر درجة الحرارة الموجود في لوحة التحكم المثبتة على جدار خزان المحول من الخارج عبر أنابيب شعيرية (Capillary tubes) كما هو مبين في الشكل (1-94). و إلى جانب قياس درجة حرارة الريت وعرضها عبر المؤشر فإن لهذا الجهاز وظائف أخرى كالتحكم في عمل مراوح التبريد في حال إرتفاع الحرارة بالإضافة إلى إصدار إشارة

تحذير (Alarm) وأمر فصل قسري للمحول (Trip) في حال تجاوزت حرارة الزيت حدود مُعينة مضبوطة مسبقاً.



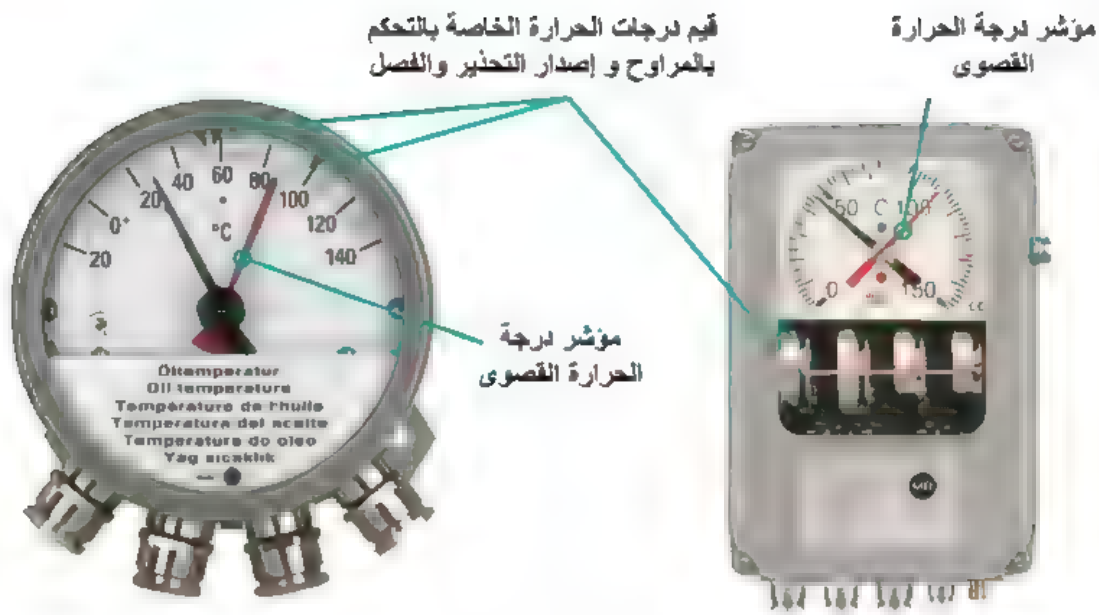
الشكل رقم (1-94)

كما وتجدر الإشارة إلى أنه في بعض التصميمات يكون هنالك مؤشران للزيت أحدهما لقياس درجة حرارة الزيت العلوي ويُسمى (Top Oil Temperature Indicator) والآخر لقياس درجة حرارة الزيت السفلي و يُسمى (Bottom Oil Temperature Indicator).

وفي التصميمات الحديثة للمحولات عادة ما يكون هنالك مؤشرين لدرجة حرارة للزيت، أحدهما للتحكم بمراوح التبريد والآخر للحماية من إرتفاع درجة الحرارة وإصدار إشارة التحذير (Alarm) وأمر الفصل القسري للمحول (Trip) وذلك لزيادة الموثوقية حيث تدور فلسفة هذا التصميم في الفصل بين أجهزة التحكم وأجهزة الحماية.

• مؤشر حرارة الملفات – Winding Temperature Indicator WTI

على النطير من مؤشر حرارة الزيت (OTI) هنالك مؤشر لقياس درجة حرارة الملفات أيضاً له نفس الوظيفة في بعض الأحيان من قياس للحرارة و التحكم بمراوح التبريد ومضخة الزيت بالإضافة إلى إصدار إشارة تحذير (Alarm) وأمر فصل قسري للمحول (Trip) في حال تجاوزت حرارة الملفات حدود مُعينة مضبوطة مسبقاً. و نظراً لتعقيد تركيب الملفات ونظام عزلها سابق الذكر بالإضافة لتسهيل عملية الصيانة فإنه من غير المُمكن وضع حساس الحرارة الخاص بهذا المؤشر داخل الملفات، لذلك يتم اللجوء إلى طريقة غير مباشرة (Thermal Imaging) لمعرفة درجة حرارة الملفات عن طريق إشتقاقها من درجة حرارة الزيت و مقدار التيار المار في الملفات كما هو موضح بالشكل (1-94).



الشكل رقم (1-95)

الشكل (1-95) يبين الأجزاء الرئيسية لمؤشر الحرارة مع قيم درجات الحرارة الخاصة بالتحكم بالمراوح وإصدار إشارة التحذير (Alarm) و الفصل القسري للمحول (Trip). وكمثال يتم ضبط درجات الحرارة الخاصة بالمؤشر كالآتي: عند 60° درجة مئوية يتم إصدار أمر تشغيل المراوح وعند 75° درجة مئوية يتم إصدار أمر تشغيل لمصحة الريت إن وُجدت و عند 110° درجة مئوية يتم إصدار إشارة تحذير (Alarm) و عند 120° درجة مئوية يتم إصدار أمر فصل قسري للمحول (Trip).

كما وتُجدر الإشارة إلى أنه في بعض التصميمات يتم اعتماد مؤشرين لدرجة حرارة الملفات، أحدهما لملفات الفولتية المرتفعة ويُسمى (HV Winding Temperature Indication) والآخر لملفات الفولتية المنخفضة ويُسمى (LV Winding Temperature Indicator).

ملحوظة (1-14): من الشكل (1-95) يُمكن ملاحظة وجود مؤشر باللون الأحمر وطيفته تحديد أعلى قيمة درجة حرارة وصل إليها الزيت أو الملفات ويبقى عندها، ففي حال إرتفعت درجة الحرارة لحدود معينة ثم انخفضت بعد ذلك فإن هذا المؤشر يبقى عند وضعيته ولا ينخفض بانخفاض المؤشر الرئيسي وعند عمليات الصيانة يتم عمل إرساء (Reset) لهذا المؤشر يدوياً بجعله ملاصق للمؤشر الرئيسي.



• مؤشر مستوى الزيت – Oil Level Indicator

يتم تثبيت مؤشر مستوى الزيت على خزان التعويض (Conservator tank) الخاص بالخزان الرئيسي و الخاص بمُغَيِّر الخطوة (Tap-changer) إن وُجد كما هو مبين في الشكل (1-25)، و تتكون هذه المُعدّة بشكل مُسط من المؤشر الخاص بمستوى الزيت بالإضافة إلى العوامة (Float) الموجودة داخل خزان

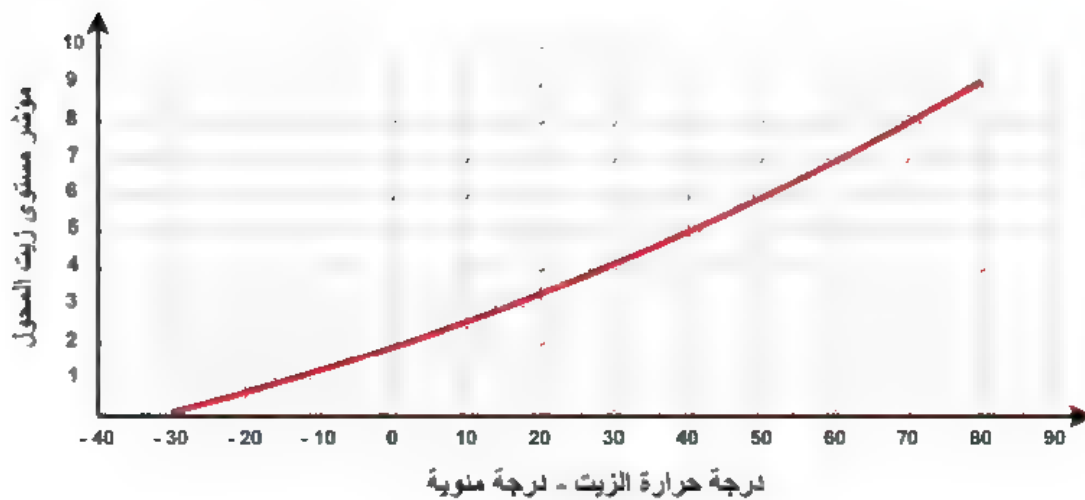
التعويض (Conservator tank) وتختلف وفقاً للتصميم إذ قد يكون مبدأ العمل مُباشر أو عن طريق تروس و (Coupling magnet).

و فيما يُخص كيمية أخذ قراءة هذا المؤشر فإن التدرج الخاص بهذا المؤشر يختلف من تصميم لآخر، حيث تكتفي بعض التصاميم بوضع متوسط الحد الطبيعي للزيت عند درجة حرارة مرجعية عادة ما تكون (25° أو 20° أو 15°) درجة مئوية وكذلك الحد الأعلى والأدنى (Max و Min) لمستوى الزيت كما هو مبين في الشكل (1-96) (أ)، وبعض التصاميم وضعت أرقام فقط كما هو مبين في الشكل (1-96) (ب) وأُرفقت منحنى خاص بهذا المؤشر يُبين مستوى الزيت بالنسبة لدرجة حرارة الزيت في وقت أخذ القراءة كما هو مبين في الشكل (1-97).

وعند وصول المؤشر عند الحد الأعلى أو الأدنى يقوم بإصدار إشار تحذير (Alarm) لا تؤدي إلى فصل المحول، وهنالك بعض المحولات يقوم مؤشر مستوى الزيت بإصدار أمر فصل قسري لهذه المحولات (Trip).



الشكل رقم (1-96)



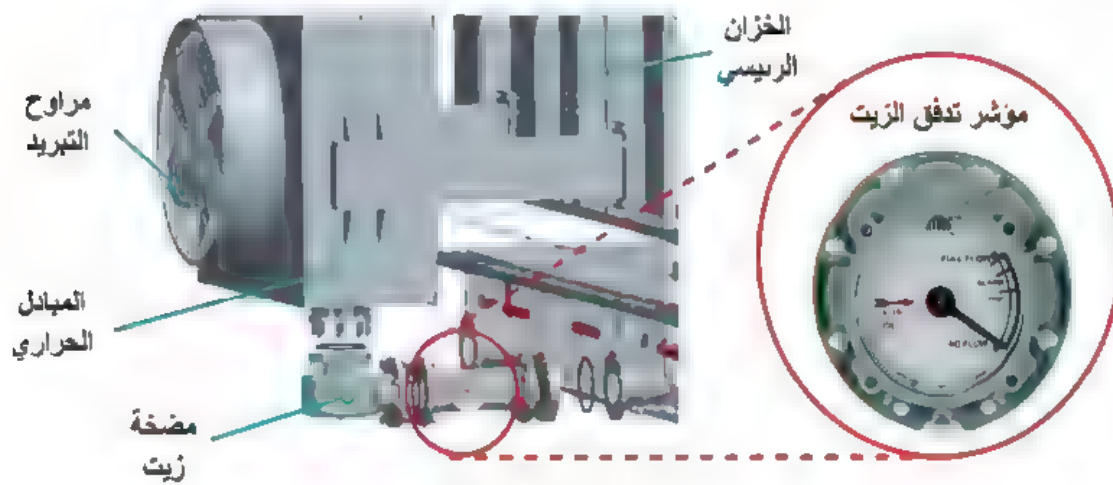
الشكل رقم (1-97)

لقراءة مستوى الزيت الخاص بالشكل (1-96) (ب) بشكل صحيح، أولاً نقوم بقراءة الرقم الموجود على المؤشر ومن ثم نقوم بقراءة درجة حرارة الزيت من مؤشر درجة حرارة الزيت، و بعد ذلك وبالرجوع للمنحنى المبين في الشكل (1-97) نقوم بإيجاد مستوى الزيت المثالي.

• مؤشر تدفق الزيت – Oil Flow Indicator OFI

يتم استخدام هذا المؤشر مع المحولات ذات طريقة التبريد التي تعتمد على الدوران القسري لزيت المحول (Oil Forced - OF) أي التي تحتوي على مضخة زيت، وذلك للتأكد من أن مضخة الزيت تعمل بشكل جيد وتضخ الزيت بالاتجاه الصحيح وكذلك التأكد من عدم وجود إسداد في طريق الزيت مما يمنع تدفقه بالكمية اللازمة لخزان المحول.

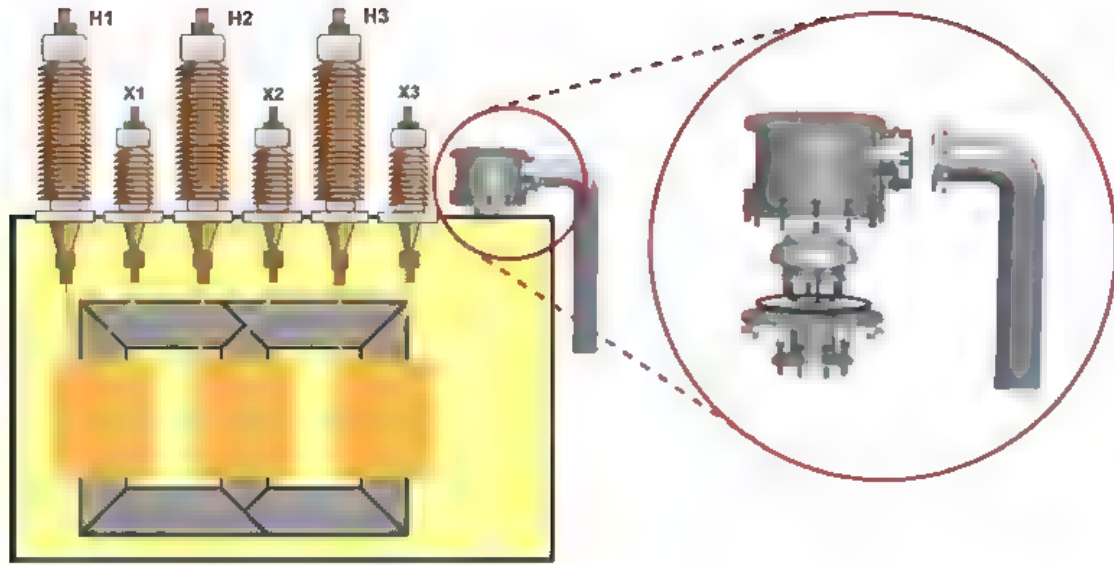
يتم تركيب هذا المؤشر على الأنبوب الرئيسي الواصل بين المبادل الحراري وحران المحول الرئيسي كما هو مبين في الشكل (1-98)، وعند انخفاض مقدار الزيت المتدفق عن القيمة المصبوطة مسبقاً يقوم بإصدار إشارة تحذير تفيد بوجود عطل (Fault Alarm) و في بعض الحالات يقوم بإصدار أمر فصل قسري للمحول (Trip) في حال استمرار الانخفاض في مقدار تدفق الزيت.



الشكل رقم (1-98)

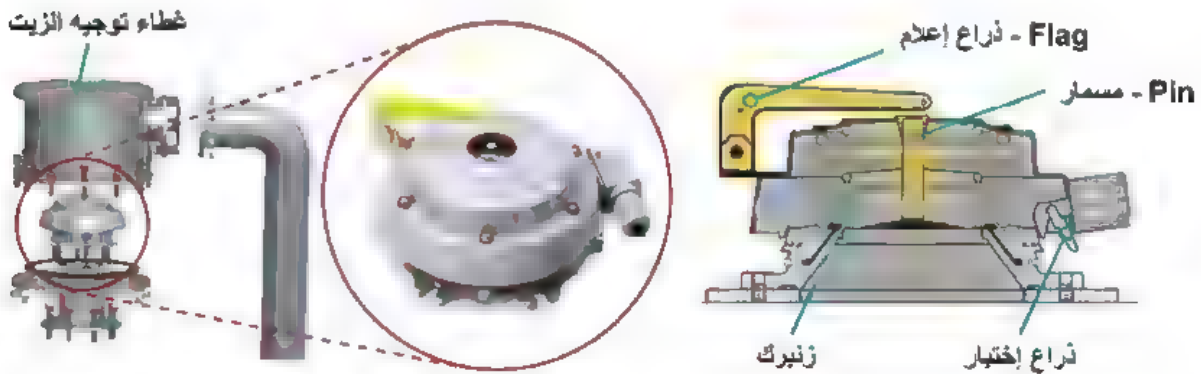
• صمام الحماية من إرتفاع الضغط بتحرير الزيت – Pressure Relief Valve or Device PRD

في حال حدوث عطل كبير (خطر) ونتيجة للإرتفاع في الضغط بفعل ظاهرة القوس الكهربائي (Arc flash) وما ينتج عنها من غازات و زيت مُحترق و لحماية خزان المحول الرئيسي من الإنبعاث أو الانفجار كان لزاماً أن يتم تركيب صمام يقوم بتحرير كمية من الزيت خارج خزان المحول بهدف تقليل الضغط الداخلي للمحول وهو ما يُسمى بصمام الحماية من إرتفاع الضغط بتحرير الزيت (PRD)، حيث يقوم هذا الصمام بتحسس الضغط الداخلي للمحول وعند إرتفاعه عن قيمة مُعينة يتعلب الزيت على ضغط الزنبرك الخاص بهذا الصمام مما يؤدي لفتحه سامحاً للزيت بالخروج من المحول لتخفيف الضغط الداخلي للخزان برمن مقداره (2ms) ملي ثانية و يقوم أيضاً بإصدار أمر فصل قسري للمحول (Trip)، و بعد زوال هذا الضغط يقوم الصمام بالإغلاق مرة أخرى.



الشكل رقم (1-99)

يتم تركيب هذه الصمام على غطاء الخزان الرئيسي العلوي للمحول كما هو مبين في الشكل (1-99) أو على أعلى حجرة الزيت الخاصة بمغيار الخطوة (Tap changer)، ويتكون هذا الجهاز من رنبرك يقوم بالضغط على غشاء معدني على قوّه أعلى الخزان وفي حال إرتفاع الضغط كما ذكر سابقاً يرتفع هذا الغطاء ويحرر الكمية اللازمة من الزيت ومن ثم يعود لحالة الإغلاق بعد زوال الضغط مع بقاء المسمار (Pin) الطاهر في الشكل (1-100) بشكل مُرتفع لأعلى للدلالة على تفعّل هذه الحماية، وأحياناً يتم وضع ذراع إعلام ملون بالأصفر أو الأحمر وظيفته الدلالة على تفعّل هذه الحماية حيث يبقى مرتفعاً بعد زوال الضغط وفصل المحول.



الشكل رقم (1-100)

ملحوظة (1-15): تختلف قيمة الضغط التي يعمل عندها هذا الصمام باختلاف سعة وتصميم المحول، فبالرجوع إلى صمامات الحماية المُصنعة من قبل شركة (MR) نجد أن الضغط الذي يتفعّل عنده الصمام من (0.28bar – 2.07bar) بار حسب نوع الصمام.

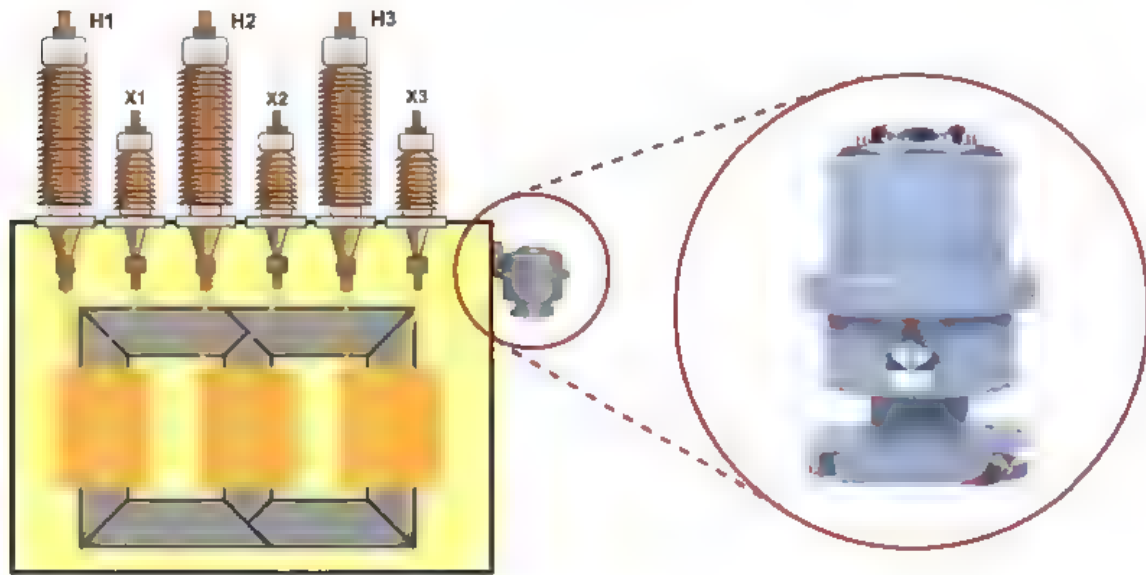


ملحوظة (1-16): عادة ما يُدَلّ لون المسمار (Pin) على نوع مائع العزل داخل المحول، فبالرجوع إلى الكتيب التفصيلي الخاص بصمام الحماية من الضغط (PRD) المُصنع من قبل شركة (QUALITROL) سنجد أن اللون الأصفر يدل على الزيت المعدني واللون الأحمر يدل على زيت الأسكاريل و اللون الأزرق يدل على الزيت السيليكوني.

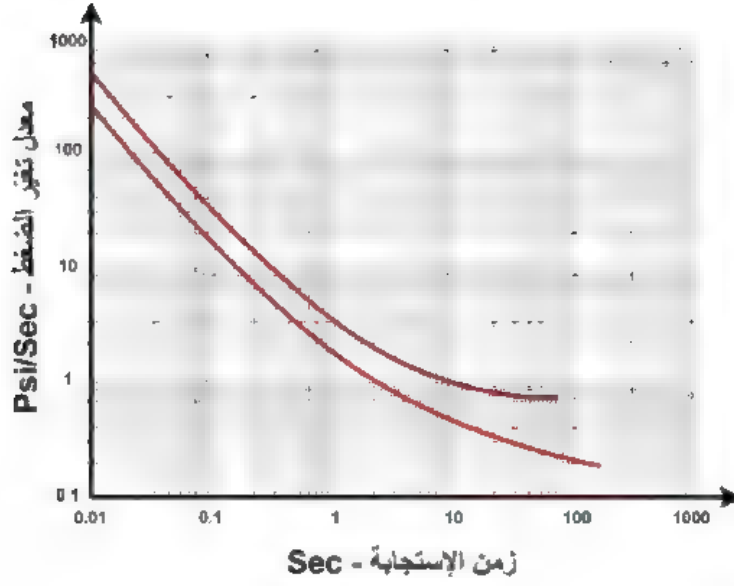


• مُرحل الحماية من الإرتفاع المفاجئ للضغط – Rapid Pressure Rise Relay – RPRR

ويُسمى أيضاً بالـ (Sudden Pressure Relay)، حيث يشترك هذا المُرحل (RPRR) و صمام الـ (PRD) سابق الذكر في نفس الوظيفة وهي حماية المحول من إرتفاع الضغط في حال حدوث قوس كهربائي داخلي (Internal Arc)، ولكنهما يفترقان في أن صمام الـ (PRD) ذو قيمة ضغط تشغيلي إستاتيكي ثابتة وأيضاً زمن تشغيلي ثابت أي أنه يعمل في حال إرتفع الضغط الداخلي للمحول عن قيمة معينة محددة مسبقاً وأيضاً يقوم بتحرير الزيت خارج الخزان، أما فيما يخص مُرحل الحماية من الإرتفاع المفاجئ للضغط (RPRR) فإنه يعمل وفقاً لإرتفاع الضغط الديناميكي كنتيجة لمعدل سرعة تغيّر الضغط داخل المحول ولا يقوم بتحرير الزيت خارج الخزان بل يكتفي بإصدار أمر فصل قسري للمحول (Trip)، أي أنه كلما كان إرتفاع الضغط داخل المحول أسرع كلما كان زمن الإستجابة أقل، ويُقصد بزمن الإستجابة الزمن اللازم لإصدار أمر الفصل القسري للمحول (Trip) كما هو مبين بالشكل (1-102). وعادةً ما يتم تركيب هذا المُرحل على أعلى جدران الخزان الرئيسي الجانبية للمحول كما هو مبين بالشكل (1-101)



الشكل رقم (1-101)

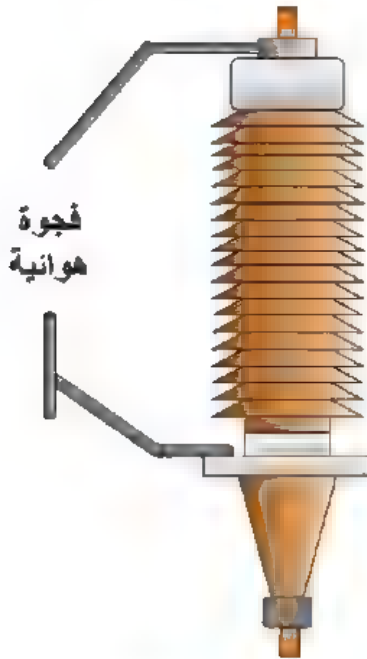


الشكل رقم (1-102)

الشكل (1-102) يبين العلاقة بين سرعة التغير في الضغط الداخلي للمحول و الحد الأعلى والأدنى لزمان الإستجابة لأحد أنواع مرحلات الحماية من الإرتفاع المفاجئ في الضغط المُصنع بواسطة شركة (QUALITROL).

• قرون التفريغ – Arcing Horns

و تُسمى أيضاً بفجوة التفريغ (Spark Gap)، و يتم تركيبها على عوارل إختراق المحولات (Bushings) وذلك لحماية عازل الإختراق (Bushing) من شرارة القوس الكهربائي التي قد تظهر نتيجة لتعرضها لفولتياوات مرتفعة ذات تردد مرتفع بفعل البرق أو إختلاف الأحمال المفاجئ أو حدوث الأعطال.



الشكل رقم (1-103)

و تتكون قرون التفريغ (Arcing horns) من زوج من الموصلات يتم تركيبها على رأس عازل الإختراق (Bushing) وعلى قاعدة تثبيته (Mounting Flange) ومنه للأرض، بحيث يفصل بين هذه الموصلات فجوة هوائية كما هو موضح بالشكل (1-103). وعند تعرض عازل الإختراق (Bushing) و قرون التفريغ (Arcing horns) لفولتياوات مرتفعة تنهار عازلية الفجوة الهوائية بين موصلي قرون التفريغ (Arcing horns) مصدرة شرارة قوس كهربائي (Arc flash) ليتم التفريغ عبر القرون عوضاً عن سطح العازل الخارجي لعازل الإختراق (Bushing).

و يتناسب طول الفجوة الهوائية بين موصلات قرون التفريغ (Arcing horns) مع مقدار الـ (Lightning Impulse withstand voltage) للمحول وعادة ما تكون أقل من مسافة التفريغ (Flash-over distance) لعوارل إختراق المحول، وقد أوردت بعض

الشركات إقتراحات لطول الفجوة الهوائية وفقاً لنوع عازل الإحتراق (Bushing) المُصنع من قَبْلِهَا بالإضافة إلى مستوى الفولتية التشغيلية لعازل الإختراق (Bushing) كما هو مبين بالجدول (1-11) و الذي يتضمن طول الفجوة الهوائية المقترح لعازل الإختراق (Bushing) المحولات من طراز (PNO) المُصنع بواسطة (Passoni & Villa) أو (General Electric- GE) حالياً.

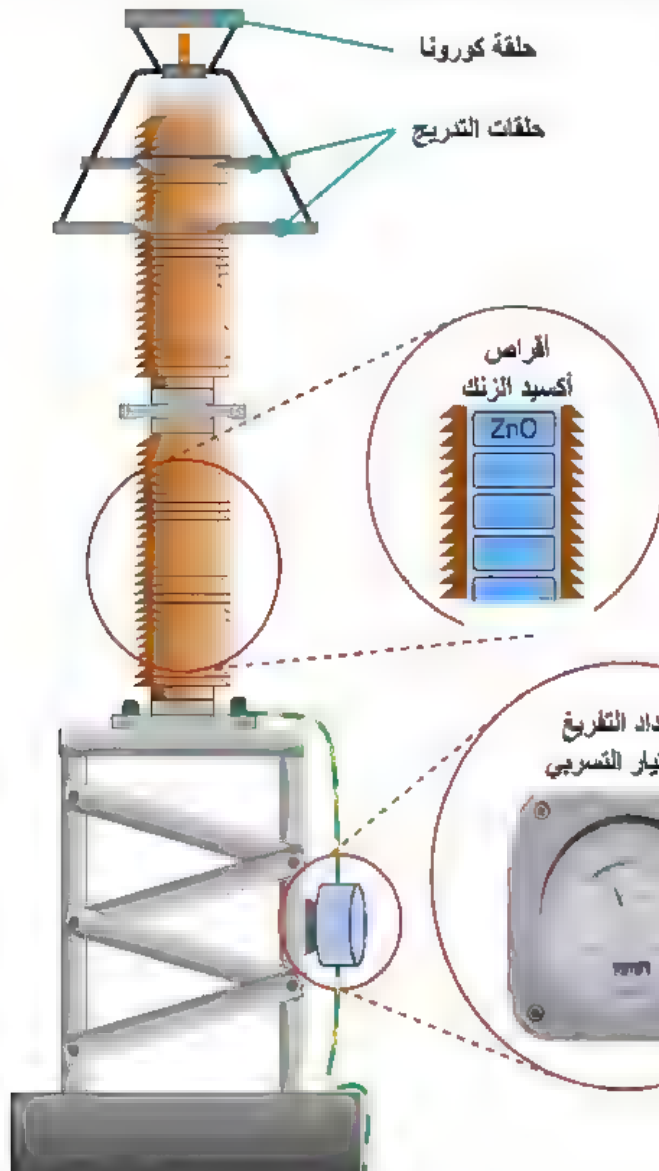
الجدول رقم (1-11)

الفولتية الإسمية، كيلو فولت	طول الفجوة الهوائية، ملم
52	320
72.5	450
100	600
123	750
145	900
170	1000
245	1450

• حارفة/مانعة الصواعق – Surge Arrester SA

تُعد قرون التفريغ (Arcing horns) سابقة الذكر أكثر الوسائل شيوعاً للتخلص من الفولتيات المرتفعة ذات التردد المرتفع في الشبكة وذلك لبساطة تركيبها و سعرها المنخفض، ولكن من أوجه قصورها أنها غير قادرة على منع التيارات التابعة أو ما يُسمى بالـ (Follow-on currents) وهي التيارات التي تتبع حدوث إنهيار الفجوة الهوائية لقرون التفريغ عند تعرضها للفولتيات العالية مما يؤدي لحدوث قصر مؤقت، بالإضافة إلى بعض الأعطال الناتجة عن العمل الخاطئ لقرون التفريغ نتيجة لتجمع الطيور عليها مثلاً.

بناءً على ما سبق و خاصة في أنظمة الفولتية المرتفعة عادة ما يتم إستخدام حارفة/مانعة الصواعق (Surge Arrester) على التوازي مع عوازل إحتراق المحولات (Bushings) للحد من تأثير الفولتيات المرتفعة عليها و الحَوَل دون حدوث شرارة قوس كهربائي و تتكون حارفة/مانعة الصواعق (SA) من



الشكل رقم (1-104)

أقراص أكسيد معدن (Metal Oxide MO) وعادة ما يتم إستخدام أقراص أكسيد الزنك (Zn) و تعرف بإسم (Zinc Oxide Arresters ZnO)، وتكون هذه الأقراص مُرتبة بشكل عامودي في متوسط الحارفة (SA) و معزولة من الخارج بالبورسلان أو المطاط كما هو مبين بالشكل (1-104).

عند تعرض الحارفة (SA) لفولتيات عالية ذات تردد مرتفع تنخفض قيمة معاوقتها لمرور التيار مما يؤدي إلى مرور التيار إلى الأرض وتفريغ الفولتيات العالية غير المرغوب بها، وبعد زوال هذه الفولتيات ترتفع قيمة المعاوقة الخاصة بهذه الحارفة (SA) لتمنع بدورها مرور التيارات.

عادة ما يتم تركيب جهاز على كبل الحارفة (SA) الواصل

مع الأرضي يتحوي على عداد يبين عدد مرات عمل الحارفة (SA Switch-On Counter) بالإضافة إلى مؤشر تيار بالملي أمبير (mA) ليعطي إنطباع عن حالة الحارفة (SA) الداخلية كما هو مبين بالشكل (1-104)، وفي وضع التشغيل الطبيعي للحارفة (SA) وعندما تكون موصولة بالفولتية التشغيلية الطبيعية لا بد من وجود تيار تسري صغير بقيمة لا تتجاوز بضعة ملي أمبيرات ليعطي إنطباع أن الحارفة (SA) لا تُشكل دائرة مفتوحة مئة بالمئة وأنها في حال تعرضها لفولتيات مرتفعة سوف تقوم بعملها على أكمل وجه.

• حلقات الكورونا و التدرّيج – Corona and Grading Rings

تشابه حلقات الكورونا وحلقات التدرّيج من حيث العمل والشكل، فكلاهما ذو شكل حلقي من الألمنيوم ويهدف إلى تدرّيج أو تشتيت المجال الكهربائي الناتج عن الفولتية العالية (أكبر من 230 كيلوفولت) وذلك لمنع حدوث تفريغ كهربائي (Discharge)، ولكنهما يفترقان في مكان التركيب حيث يتم تركيب حلقات الكورونا (Corona rings) أعلى عازل الإختراق (Bushing) أو حارفة/مانعة الصواعق (Surge Arrester - SA) حول نقطة توصيل مُوصل الفولتية المرتفعة (HV Conductor termination point) وذلك لما تحويه هذه المنطقة من حواف حادة من شأنها زيادة المجال الكهربائي في هذه المنطقة مما يزيد احتمال حدوث تفريغ كهربائي وكذلك عمل تداخل على موجات الراديوية، حيث تُقدر قيمة الفولتية التدميرية - التي يحصل بعدها تفريغ كهربائي - بحوالي (30 kV/cm) كيلوفولت/سم.

أما فيما يخص حلقات التدرّيج فإن لها نفس الوظيفة سابقة الذكر ولكن يتم تركيبها حول أعلى العزل الخاص بعوازل إختراق الفولتية المرتفعة (HV Bushings) أو حارفة/مانعة الصواعق (Sarge Arrester) وذلك لتوزيع المجال الكهربائي على كامل العزل الخارجي الخاص بها ومنعه من التركّز في مكان معين - عادة الجزء العلوي من العزل والأقرب لمُوصل الفولتية المرتفعة - مما يؤدي لإنهياره كما يظهر في الشكل (1-104).

الملحق (1-1)

تسمية أطراف المحول وفقاً للمعايير المختلفة

لا تُد من الإحاطة بالتسميات المختلفة لأطراف المحولات وفقاً للمعايير العالمية وذلك لزيادة الفهم عند ذكرها في قادم الفصول.

Australian standards : المعايير الأسترالية
ANSI : المعهد الأمريكي للمعايير الوطنية
IEC : اللجنة الكهروتقنية الدولية

المِيعيار	أطراف ملفات الفولتية المرتفعة	أطراف ملفات الفولتية المنخفضة	أطراف الملفات الثالثة
	HV winding	LV winding	Tertiary winding
ANSI	H1 - H2 - H3 - H0	X1 - X2 - X3 - X0	Y1 - Y2 - Y3 - Y0
IEC	1U - 1V - 1W - 1N أو U - V - W - N	2U - 2V - 2W - 2N أو u - v - w - n	3U - 3V - 3W - 3N
Australian standards	A1 - A2 - A3 - N	a1 - b2 - c3 - n	3A - 3B - 3C - 3N

الملحق (1-2)

مصادر الأشكال الواردة في الفصل الأول

المصدر	الأشكال					
Turbosquid.com by ArtGraphic3d Studio	1-33	1-32*	1-31*	1-28	1-27	1-19
	1-77	1-69	1-68	1-67	1-50	1-49
AREVA Power Transformers Expertise Vol.1 & 2	1-30	1-29	1-26	1-21	1-20	
Electrical4u.com	1-25			1-24*		

* جزء من الشكل

الفصل الثاني

فحص مقاومة العزل

Insulation Resistance Test (IR)



فحص مقاومة العزل

Insulation Resistance Test

يُعتبر فحص مقاومة العزل أو كما يُسمى بالـ (Megger test) من أقدم الوسائل للتأكد من جودة وكفاءة العزل حيث تم إدراجه كأحد الفحوصات الواجب إجراؤها على التطبيقات الكهربائية في نهايات القرن التاسع عشر (1880's) في الإصدار الأول لنشرة الأنظمة الصادرة عن معهد مهندسي الكهرباء (IEEE)، حيث تدور فلسفة هذا الفحص بقياس مقاومة المادة العازلة لتسرب التيار من خلالها، هذه المقاومة التي تُعطي تصوّر عن حالة المادة العازلة وتُعبّر عن جودتها. فكما هو معلوم ومع مرور الوقت تختلف خصائص المادة العازلة وغالباً ما يكون هذا الاختلاف للأسوء نتيجة لتقادم هذه المادة العازلة، ومنه فإن وطبيعة هذا الفحص هو إعطاء إنطباع عن حالة المادة العازلة بشكل روتيني أو بعد تعرضها لطروف حوية قاسية كالحرارة والرطوبة والأوساخ، أو نتيجة لتعرضها لإجهاد كهربائي كالفولتيات المرتفعة أو إجهاد ميكانيكي كالصدمات أو الإهتزازات أدى لحدوث أضرار فيزيائية لهذه المادة العازلة كالشقوق أو غيرها من الأضرار الفيزيائية التي تؤدي لضعفها وزيادة قيمة التيار المتسرب من خلالها. ونظراً لأن مقدار فولتية الفحص أقل من أو مساوي لمقدار الفولتية الإسمية الخاصة بالمحول، فإن هذا الفحص يُعتبر من الفحوصات غير التدميرية (Non-destructive test) أي أنه لا يؤثر على سلامة العزل.

وتتلخص سلامة أي محول في سلامة ثلاثة أنظمة داخلية للمحول وهي نظام العزل و النظام الميكانيكي والنظام الحراري، حيث أن أي فشل في أي من هذه الأنظمة سيؤدي إلى فشل المحول بالكامل، وهذا الفحص يُمكن من الكشف عن سلامة نظام العزل وذلك بالكشف عن حالة المادة العازلة للملفات (Windings) و القلب الحديدي (Iron Core) وكذلك دعائم التثبيت الخاصة بالقلب الحديدي (Core Clamp).

1. متى يتم إجراء هذا الفحص ولماذا؟

هنالك عدة أسباب تدفعنا لإجراء هذا الفحص ومن هذه الأسباب ما هو روتيني للتأكد من سلامة المحول أو تشخيصي لتحديد الأعطال في المحول (وهو مجال بحثنا في هذا الكتاب) أو لأسباب خاصة أخرى، وتتلخص هذه الأسباب بالآتي:

1.1 في المصنع لضبط الجودة القصصية (Quality Control - QC) وكذلك يُعتبر من فحوصات القبول القصصية (Factory Acceptance Test - FAT) للتأكد من سلامة المحول ومطابقته للتصميم قبل نقله للموقع.

1.2 في الموقع قبل كهرية المحول للمرة الأولى (Transformer first energization) كأحد فحوصات القبول الموقعية (Site Acceptance Test - SAT) للتأكد من سلامة المحول بعد نقله وتركيبه في الموقع.

1.3 قبل كهرية المحول (Transformer energization) بعد عمليات الصيانة المُختلفة في الموقع.

1.4 قبل كهرية المحول (Transformer energization) بعد توقفه لفترة طويلة من الزمن

1.5 بشكل روتيني (Routine test) وذلك للكشف عن وضع المحول الحالي وإستخدام نتيجة هذا الفحص كمرجع (Reference value).

1.6 تحديد الأعطال داخل المحول (Fault detection - Diagnostic test)، وهو ما سيتم تناوله في هذا الفصل.

2. الدوافع التشخيصية لعمل هذا الفحص وما هي الأعطال التي يتم الكشف عنها

كما هو معلوم أن هذا الفحص يهدف للكشف عن جودة وكفاءة المادة العازلة في المحول لذلك عادة ما يتم اللجوء لعمل هذا الفحص بهدف تشخيصي في حال تعرض المحول لظروف أو أحداث قد تؤدي لزيادة الإجهاد الميكانيكي الواقع على المادة العازلة داخله وما يترتب عليها من أعطال ميكانيكية أو كهربائية للمحول، وعلى سبيل المثال لا الحصر يُمكن إيجاد الأمور التالية:

- في حال ظهور إشارة تحذير (Alarm) أو حدوث فصل قسري للمحول (Trip) نتيجة لتفعل مُرحل البوخلز (Buchholz relay).
- حال ظهور نتائج غير مُرضية لفحص الغازات الدائبة في الزيت (Dissolved Gas Analysis - DGA) وخاصة عند ظهور غازات إحماء المعدن (Hot metal gases) الناتجة عن إحماء الحديد المُكوّن للقلب الحديدي للمحول أو دعائم التثبيت الخاصة بالقلب الحديدي والتي تتمثل في الغازات التالية (الميثان - CH_4 و الإيثان - C_2H_6 و الإيثيلين - C_2H_4).
- في حال إرتفاع درجة حرارة المحول، الذي قد يكون ناتج عن القلب الحديدي أو دعائمه نتيجة لوجود مشكلة في نظام العزل الخاص بهما.
- تعرّض المحول لإجهاد ميكانيكي (Mechanical stress) كالإهتزازات أو النقل أو الصدمات
- تعرّض المحول لإجهاد حراري (Thermal stress) كإرتفاع الحرارة الشديد أو إنخفاضها.
- تعرّض المحول لإجهاد كهربائي (Electrical stress) كالفولتيات المرتفعة أو الموجات العابرة.
- تعرّض المحول لإجهاد كيميائي (Chemical attack) كالأوساخ والزيت أو أخرة المواد الآكلة (Corrosive vapor).
- الظروف المحيطة بالمحول (Environment) كالحرارة والرطوبة المرتفعة.

ومن الأعطال التي يتم الكشف عنها من خلال هذا الفحص تدهور أو إنهيار المادة العازلة داخل المحول نتيجة لتسرّب الرطوبة لداخل هذه المادة العازلة أو وجود أضرار فيزيائية لحقت بها كالتشققات أو الثقوب أو وجود فجوات هوائية.

3. فلسفة الفحص

تَكُن وظيفة المادة العازلة الخاصة بالمحولات في إبقاء التيار الكهربائي داخل موصلاته أو ما يُسمى بالملفات، وتسرب هذه التيار الكهربائي إلى خارج الملفات يجعله من غير المعيد بل والخطير في بعض الأحيان، لذلك يُمكن الإستنتاج من أن خصائص هذه المادة العازلة على النقيض من خصائص المادة الموصلة المُكوّنة للملفات كالحاس أو الألمنيوم، فالأخيرة من أهم خصائصها المقاومة القليلة لمرور التيار أما المادة العازلة فمن أهم خصائصها المقاومة المرتفعة لمرور التيار مما يحول دون مرور التيار من خلالها وحل مروره مقتصرًا على موصلاته فقط أي داخل ملفات المحول، لذلك فإن مبدأ هذا الفحص يدور حول قياس مقاومة المادة العازلة للتأكد من سلامتها وأنها قادرة على القيام بوظيفتها المناطة بها.

يُستخدم لقياس مقاومة العزل جهاز يُسمى ميجر أو ميغا أوميتر (Megger أو Megohmmeter)، وُسمي بهذا الإسم لأنه عادةً ما تكون قيمة المقاومة المُقاسة في هذا الفحص بالميجا أوم (Mega Ohm). ويحتوي هذا الجهاز على مولد تيار ثابت (Direct Current Generator) حيث يقوم هذا الجهاز بتطبيق فولتية ثابتة (DC Voltage) على الجُزء المُراد قياس مقاومة عزله كالملفات أو القلب الحديدي أو دعائم تثبيت القلب الحديدي والذي بدوره يؤدي إلى مرور تيار تسري قليل من خلال هذا العزل ومنه يتم احتساب قيمة المقاومة وفقاً لقانون أوم (Ohm's Law) ويُمكن أن يكون هذا الجهاز يدوي (Hand-driven) كالنسخ القديمة منه أو ذو محرك كهربائي (Motor-driven) أو إلكتروني (Electronic).

كما دُكر سابقاً أن المادة العازلة ذات مقاومة مرتفعة وقيمة التيار المُتسرب من خلالها مساوٍ للصفر نظرياً وهذا ما يُسمى بالعازل المثالي، أما في الواقع فإنه عند تطبيق فولتية ثابتة (DC voltage) على العازل تنشأ تيارات تسريبية داخل وعلى سطح هذا العازل والتي من خلالها يتم احتساب قيمة مقاومة هذا العازل وتتكون هذه التيارات من المُركبات التالية:

✓ تيار الشحن السعوي Capacitive Charging Current.

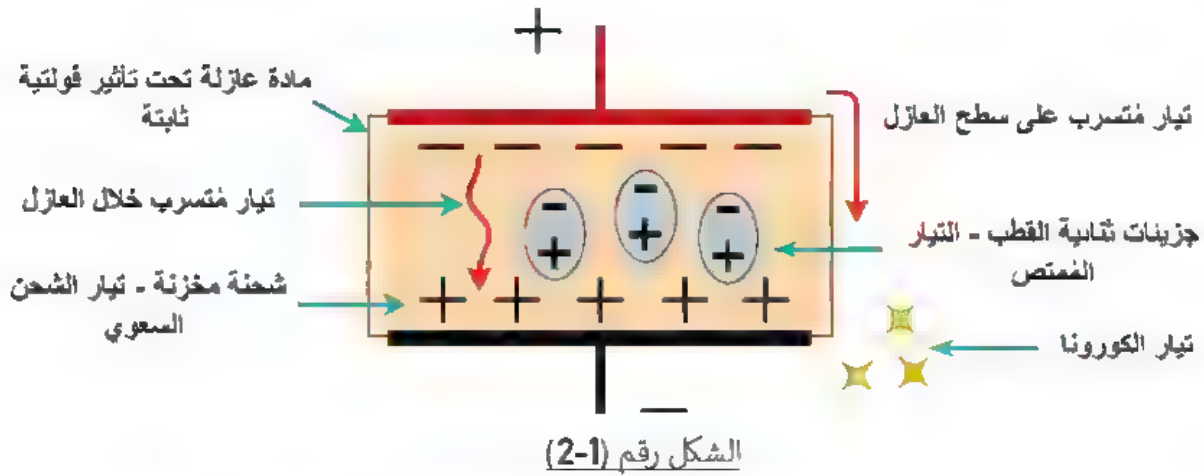
✓ التيار المُمتص من العازل - Dielectric Absorption Current.

✓ التيار المُتسرب أو المُوصل Conduction or Leakage Current.

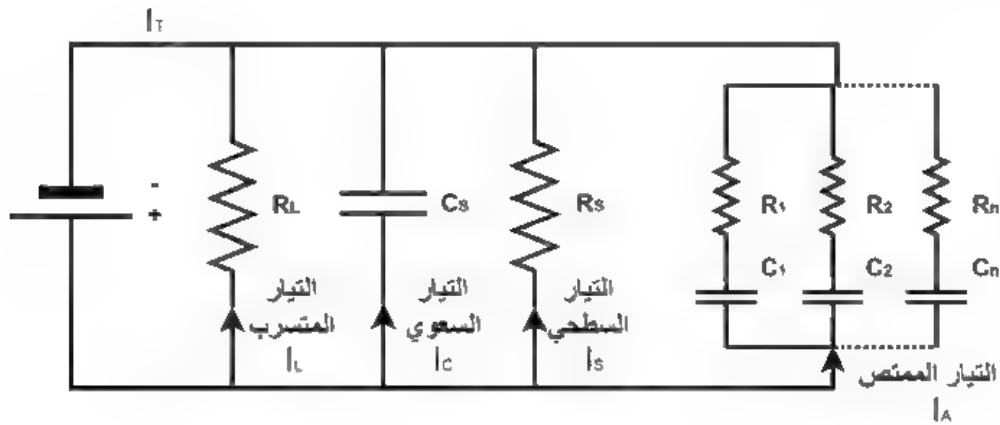
✓ تيار التفريغ الجزئي (ظاهر الكورونا) Partial Discharge Current (Corona)

✓ تيار التسرب السطحي - Surface Leakage Current

الشكل (2-1) يوضح مُركبات التيار المُتكوّنة نتيجة لتطبيق فولتية ثابتة (DC Voltage) على المادة العازلة.



كما ويُمكن رسم الدائرة المُكافئة للمادة العازلة وهي تحت تأثير فولتية الفحص الثابتة كما هو مُبين في الشكل (2-2) والذي يوضح مُركبات التيار المُتسرب عبر المادة العازلة وعلى سطحها - [IEEE Std 43-2013].



الشكل رقم (2-2)

• المُركبة الأولى: تيار الشحن السعوي - Capacitive Charging Current I_C

وهو تيار يبدأ بقيمة مرتفعة ثم ينخفض إلى أدنى قيمه له قرابة الصفر بعد شحن مواسعة المادة العازلة إلى الفولتية الكاملة (Full voltage)، وعادةً يحتاج هذا التيار إلى عشرات الثواني لكي يقل إلى أدنى مستوى له حيث يُمكن إهماله مقارنة بالتيارات الأخرى. كما ويعتمد هذا التيار على مقدار فولتية الفحص وكذلك حجم ونوع المحول المُراد فحصه.

ولحساب قيمة هذا التيار السعوي يُمكن تطبيق المعادلة (2.1) التالية:

$$I_C = \left(\frac{E}{R}\right) e^{-t/RC} \quad (21)$$

حيث:

I_C	: تيار الشحن السعوي.
E	: فولتية الفحص بالكيلوفولت (kV).
R	: المقاومة بالميجا أوم (MΩ).
C	: المواسعة بالمايكروفاراد (μF).
t	: الزمن بالثواني (s).

• المُركبة الثانية: التيار المُمتص من العازل - Dielectric Absorption Current I_A

و هو تيار يُمثل الطاقة الإضافية اللازمة لإعادة توجيه - ترتيب - جزيئات المادة العازلة نتيجة لتأثير المجال الكهربائي المطبق عليها أثناء فحص مقاومة العزل، ويكون التيار بالبداية مرتفع ثم ينخفض الى أدنى قيمه له قراءة الصفر بعد توجيه أغلب جزيئات هذه المادة العازلة، وعادةً ما يحتاج هذا التيار من عدة ثواني إلى عدة دقائق للمحولات لكي يصل الى أدنى مستوى له حيث يُمكن إهماله مقارنة بالتيارات الأخرى. وتُحذر الإشارة إلى أن التناقص في قيمة هذا التيار يتناسب عكسياً مع مقدار المواسعة التي يُشكلها العازل وكذلك يعتمد هذا التيار على نوع المادة العازلة ووضع المادة العازلة (**Insulation Condition**) من مستوى ملوثات أو رطوبة بداخلها.

ولحساب قيمة هذا التيار المُمتص يُمكن تطبيق المعادلة (22) التالية:

$$I_A = ECDT^{-n} \quad (22)$$

حيث:

I_A	: التيار المُمتص.
E	: فولتية الفحص بالكيلوفولت (kV).
C	: المواسعة بالمايكروفاراد (μF).
D, n	: ثوابت.

ومما سبق من تعريف لتيار الشحن السعوي (I_C) و التيار المُمتص (I_A) من العازل ونتيجة لقيمتهم الابتدائية المرتفعة، ووفقاً لقانون أوم (**Ohm's Law**) يُمكن ملاحظة السبب الرئيسي وراء إنخفاض قيمة مقاومة العزل (**Insulation Resistance**) في الثوابي الأولى لهذا الفحص، والذي بدوره يجعل قيمة هذه المقاومة في بداية الفحص مُهملة ولا تعكس الحالة الواقعية للمادة العازلة بل ويجب الإنتظار حتى تتلاشى هذه التيارات (I_A و I_C) و ترتفع قيمة مقاومة العزل ومن ثم نقوم بتسجيلها لتكون ذات فائدة.

• المُرَكَّبَة الثالثة: التيار المُتسرب أو المُوصل I_L - Conduction or Leakage Current

وهو يُمثل التيار المُتبقى بعد إنخفاض قيمة التيارين (I_A و I_C) السابقين حيث أنه التيار المُتسرب أو المُوصل من خلال المادة العازلة وهو التيار المطلوب لحساب قيمة مقاومة العزل كما هو مبين بالشكل (2-3)، حيث تبدأ قيمة هذا التيار من الصفر وتتصاعد إلى حد معين ثم تبقى ثابتة إلى إنتهاء الفحص.

ولكن يبقى التساؤل المطروح "كيف يُعطى التيار التسريبي خلال المادة العازلة إنطباع عن حالة هذه المادة العازلة الداخلية ومدى كفاءتها؟".

كما هو معلوم أن المادة العازلة تمتلك خاصية إمتصاص الشحنات الكهربائية و توصيلها بشكل دائم أو مؤقت، لذلك عند تطبيق فولتية ثابتة (DC Voltage) على هذا المادة العازلة فإن جزيئات هذه المادة الحاملة للشحنات الموجبة والسالبة تتأثر بالفولتية المُطبقة، وكمثال على جزيئات المادة العازلة هنالك ما يُسمى بجزيئات ثنائية القطب (Dipoles) و سُميت كذلك لحملها شحنة موجبة صغيرة على أحد أطرافها وعلى الطرف الآخر شحنة صغيرة سالبة، وعند تعرض هذه الجزيئات ثنائية القطب (Dipoles) للفولتية الثابتة وما ينتج عنها من مجال كهربائي تقوم هذه الجزيئات بالإصطفاف بإتجاه المجال الكهربائي المُطبّق أو ما يُسمى بإستقطاب الجزيئات ثنائية القطب (Dipoles polarization) حيث أن الطاقة اللازمة لعملية الإستقطاب يُمكن تمثيلها بالتيار المُمتص (Absorption current).

ولكن هنالك جزيئات تحمل شحنة داخل المادة العازلة ولكنها حرة أي ليست كجزيئات ثنائية القطب سابقة الذكر وهذا ما يتيح حركتها بين الأقطاب الموجبة والسالبة للفولتية المُطبقة على المادة العازلة والتي يُمكن تمثيلها بالتيار التسريبي خلال العازل (Leakage current)، وهذا بدوره يُفسّر العلاقة بين قيمة التيار التسريبي وحالة المادة العازلة للمحول.

• المُرَكَّبَة الرابعة: تيار التفريغ الجزئي (تيار الكورونا) I_P - Partial Discharge Current

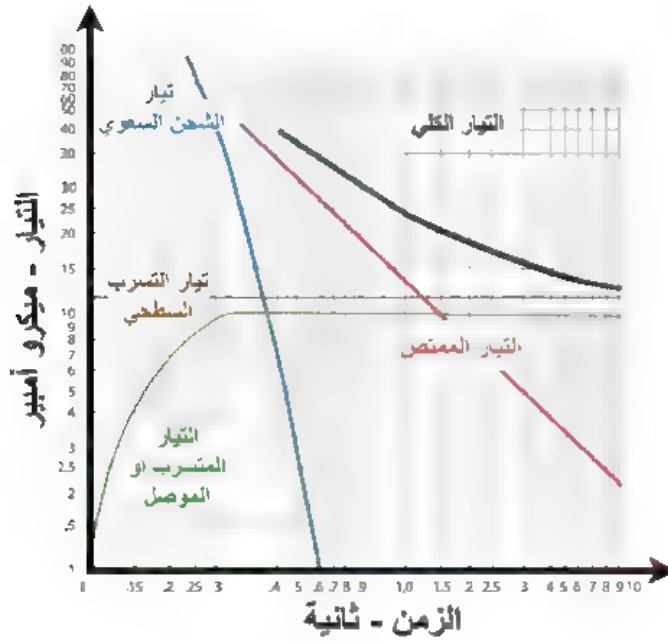
أو كما يُسمى تيار الكورونا وهو نتيجة للإجهاد الكهربائي الذي يتعرض له الهواء المحيط بالمنطقة المشحونة بالفولتية المرتفعة خاصة تلك الحواف الموصلة الحادة، وعادةً ما يظهر هذا التيار عند الفولتيات المرتفعة الأكبر من (4kV) كما ويُمكن إهماله عند إجراء هذا الفحص لغايات التبسيط.

• المُرَكَّبَة الخامسة: تيار التسرب السطحي I_S - Surface leakage Current

وهو التيار المار على سطح العازل الخارجي، أي التيار المار بالمقاومة الموجودة على التوازي مع مقاومة العازل كما هو مبين بالشكل (2-2)، وهذا التيار يعتمد على نظافة ورطوبة سطح العازل ويكون ذو قيمة ثابتة مع مرور الزمن.

يُمكن للملوثات أو قطرات الندى المُتكوّنة على سطح العازل أن تزيد من تيار التسرب السطحي للعازل، وعادةً ما يتم ملاحظة هذه الظاهرة عند إجراء هذا الفحص في ساعات الصباح الباكر في الأجواء الباردة، حيث أن قطرات الندى المُتكوّنة على سطح المادة العازلة (البورسلان) مثلاً من شأنها زيادة تيار التسرب السطحي والذي بدوره يؤثر على دقة هذا الفحص، لذلك وللتخلص من هذه المُركبة يجب تنظيف

سطح العازل جيداً قبل إجراء الفحص كتنظيف العزل الخارجي - البورسلان عادةً - عند فحص المحولات، وكذلك إجراء الفحص في درجة حرارة جو محيطية مناسبة مع أخذ رطوبة الجو بعين الاعتبار، بالإضافة إلى إمكانية استخدام منفذ الـ (Guard) في أجهزة فحص مقاومة العازل ليقوم بتحسس هذا التيار وطرحه من القيمة الكلية للتيار المُقاس ليتم الحصول على قيمة مقاومة عازل أكثر دقة كما سيتم شرحه لاحقاً.



الشكل رقم (2-3)

وقبل الخوض في تفاصيل الفحص لا بُد من الإجابة عن سؤال في غاية الأهمية وهو "لماذا يتم هذا الفحص بتطبيق فولتية ثابتة (DC Voltage) عوضاً عن الفولتية المترددة (AC Voltage) المُتعارف عليها والتي يعمل عليها المحول في ظروف التشغيل الطبيعية؟ وهل يُمكن الكشف عن حالة المادة العازلة من خلال تطبيق فولتية مترددة (AC Voltage)؟"

كإجابة سريعة عن الشق الثاني للتساؤل يُمكن القول "نعم" يُمكن للفولتية المترددة (AC Voltage) الكشف عن حالة العازل في بعض المواطن كما هو الحال في فحص الفولتية المرتفعة (Hi-pot test) وفحص معامل التبديد أو القدرة (DF/PF)، أما فيما يخص الشق الأول من التساؤل تم عمل مُقارنة بين الفولتيتين (AC & DC) وإدراجها في الجدول (2-1) مما يُتيح فهم أكثر لهذا الفحص.

ملحوظة (2-1): يُمكن التعبير عن قيمة هذا الفحص بالتيار التسريبي من خلال العازل (mA or μ A) أو مقاومة هذا العازل (k Ω , M Ω , G Ω or T Ω)، حيث أن بعض الأعطال يسهل الكشف عنها بمراقبة تيار التسريبي عوضاً عن المقاومة إلا أن قيمة المقاومة هي الأكثر إنتشاراً للتعبير عن هذا الفحص. وتُجدر الإشارة إلى أن أجهزة الفحص المختلفة والمُصنّعة بواسطة كبرى الشركات مثل (MEGGER & METREL) وغيرها من الشركات تتيح إختيار فيما إذا أردت أن تكون نتيجة الفحص على شكل تيار متسرب أو مقاومة عزل.



الجدول رقم (1-2)

وجه المقارنة	الفحص باستخدام فولتية مترددة AC voltage	الفحص باستخدام فولتية ثابتة DC Voltage
التيارات الناتجة عن الفحص	تيار سَعوي كبير تيار تسرب مادي وتيار مُمتص قليل	تيار سَعوي قليل تيار تسرب مادي ومُمتص كبير وهو المطلوب لقياس مقاومة العازل
الغاية من الفحص	معرفة مدى تحمل المادة العازلة للفولتيات المرتفعة (يُعطي دلالة على مدى جودة العزل دون قيمة مُقاسة)	معرفة قيمة مقاومة المادة العازلة (يُعطي قيمة مُقاسة تُعبّر عن مدى جودة العزل)
خطورة الفحص على العازل	خطير (تدميري) نتيجة لتطبيق فولتيات مرتفعة	غير خطير (غير تدميري)
إمكانية تعويض الفولتيتين	لا يُمكنه تعويض فحص الفولتية الثابتة	يُمكنه تعويض فحص الفولتية المترددة وذلك بزيادة قيمة الفولتية الثابتة المُطبقة حيث يُعطي نفس النتيجة
التكلفة والوزن والحجم لجهاز الفحص	كبير	قليل

4. أمور لا بُد من مراعاتها قبل البدء بالفحص

4.1 إستقرار درجة حرارة المحول

كما هو معلوم أن قيمة المقاومة من القيم التي تتأثر بالحرارة بشكل كبير، لذلك وللحصول على قيمة مقاومة عزل حقيقية وللحد من تأثير الحرارة على قيمة هذه المقاومة يجب التأكد من إستقرار درجة حرارة زيت وملفات المحول قبل القيام بالفحص، أيضاً يجب تجنب القيام بالفحص في درجة حرارة جو أقل من درجة حرارة تكوّن قطرات الندى (Dewpoint temperature).

وفي هذا الباب يبقى التساؤل المطروح "كيف يُمكن التأكد من أن المحول وصل إلى مرحلة إستقرار الحرارة قبل البدء بالفحص؟"

كثرت الآراء والشواهد التي تؤكد أن المحول مُستقر حرارياً، فبالرجوع إلى أشهر المعايير العالمية (Standards) يُمكن القول أن المحول مُستقر حرارياً فيما إذا تحققت واحدة من الشروط التالية:

- عندما يكون مقدار التغير في درجة حرارة الزيت العلوي (Top Oil Temperature) أقل من درجتين مئويتين لكل ساعة من الزمن حسب معايير (Standards) معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Std C57.12.90-2015]
- مرور فُرابة الثلاث ساعات على عزل المحول كهربائياً (Transformer De-energization)، وذلك للمحولات التي لا تحتوي على مضخة زيت أي ذات نظام التبريد الذي يعتمد على الدوران الطبيعي للزيت (Oil Natural - ON)، حسب معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Std C57.12.90-2015].
- مرور فُرابة الساعة على عزل المحول كهربائياً (Transformer De-energization)، وذلك للمحولات التي تحتوي على مضخة زيت أي ذات نظام التبريد الذي يعتمد على الدوران القسري للزيت (Oil Forced - OF)، مع مراعاة إبقاء المضخة بالعمل بعد عزل المحول كهربائياً إلى وقت بداية المحص حسب معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Std C57.12.90-2015].
- عندما يكون متوسط درجة حرارة الزيت العلوي (Top Oil Temperature) والسفلي (Bottom Oil Temperature) مساوياً بشكل تقريبي لدرجة حرارة الملفات (Winding Temperature) حسب معايير اللجنة الكهروتقنية الدولية [IEC 60076-1 2011].
- عندما يكون الفرق في درجة الحرارة بين زيت المحول العلوي (Top Oil Temperature) و السفلي (Bottom Oil Temperature) لا يزيد عن (5°) درجات مئوية حسب معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Std C57.12.90-2015].

4.2 تسجيل درجة الحرارة

يجب تسجيل درجة حرارة الجو المحيط (Ambient Temperature) وكذلك درجة حرارة الملفات (Winding Temperature) قبل البدء بالفحص وذلك بأخذ قيمة درجة حرارة الملفات عبر مؤشر درجة الحرارة الخاص بالملفات (Winding Temperature Gauge) و المثبت على جانب المحول في لوحة التحكم الخاصة بالمحول، وفي حال تَعُدُّر أخذها فإنه يتم إعتماد متوسط درجة حرارة الزيت الخاص بالمحول عبر مؤشرات درجة حرارة الزيت ككل أو العلوي و السفلي إن وجدت (Top/Bottom Oil Temperature Gauges).

4.3 فصل متحسسات الحرارة من النوع (P100) إن وجدت

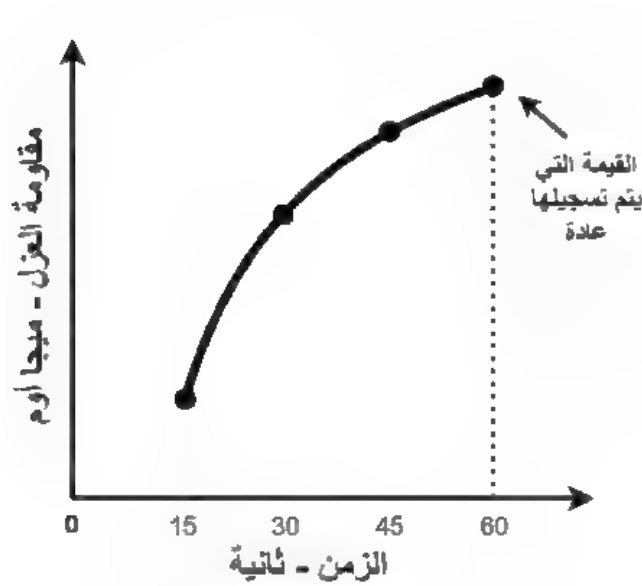
في حال إستخدام متحسس حرارة من النوع المادي (PT100)، فإنه يُفَضَّل فصل أطراف هذه المتحسسات وعمل دائرة قِصَر لهذه الأطراف (Short circuit) ومن ثم وصلها بالأرضي وذلك للحفاظ عليها من أية أضرار قد تلحق بها بسبب هذا الفحص.

5. أساليب الفحص

توجد عدة أساليب يُمكن إتباعها عند القيام في هذا الفحص فمنها ما يكتفي بتطبيق فولتية الفحص لزمن قصير وقياس مقاومة العزل كأسلوب قراءات الزمن القصير أو كما يُسمى (Spot Test)، ومنها ما يقوم بإيجاد العلاقة بين مقاومة العزل والزمن مثل مؤشر الإمتصاص (Absorption Index - AI) و مؤشر الإستقطاب (Polarization Index - PI)، ومنها ما يقوم بإيجاد العلاقة بين مقاومة العزل والفولتية مثل أسلوب التدرج بالفولتية (Step-voltage Test - SV) و (Ramp-voltage Test)، ومنها ما يقوم بتنوع سلوك المادة العازلة بعد زوال الفولتية المُطبقة عليها مثل أسلوب تفريغ العازل (Dielectric Discharge - DD). ويتم إختيار أسلوب الفحص المناسب وفقاً لطبيعة المُعدّة المُراد فحصها وطبيعة الفحص فيما إذا كان روتيني أو تشخيصي يهدف لكشف الأعطال بالإضافة إلى نوع العُطل المتوقع، و تُلخص هذه الأساليب بالآتي:

5.1 الأسلوب الأول: قراءات الزمن القصير - Short Time Readings

أو ما يُسمى بالـ (Spot Test)، حيث يُعتبر الفحص بهذا الأسلوب الأسهل والأبسط ويُعتمد على قياس قيمة مقاومة العزل لمدة قصيرة من الزمن عادةً من (30s - 60s) ثانية فقط، حيث يتم مراقبة منحنى القيم المُقاسة مع الزمن وتسجيل قيمة مقاومة العزل عند (60s) ثانية مع مراعاة تسجيل قيمة درجة الحرارة، كما ويُنصح بتسجيل قيمة المقاومة عند (15s, 30s, 45s & 60s) وذلك لرسم منحنى تغيّر المقاومة مع الزمن وملاحظة إرتفاع قيمة هذه المقاومة مع الزمن، كما هو مُبين في الشكل (2-4).



الشكل رقم (2-4)

وهذا الأسلوب يُعطي حالة العزل بشكل تقديري وغير دقيق وذلك لكثرة العوامل التي تؤثر عليه مثل درجة الحرارة - علاقة عكسية - والرطوبة ومقدار فولتية الفحص وكذلك حجم المحول، لكنه من ناحية أخرى مُفيد كمؤشر على سلامة العازل خاصة بعد مقارنة القيم المُقاسة الحالية بالقيم السابقة أو المرجعية مع مراعاة تصحيح القيم المُقاسة إلى درجة حرارة (20°) درجة مئوية وكذلك أخذ رطوبة الجو النسبية بعين الاعتبار.

في حال إجراء الفحص بهذا الأسلوب وتم الحصول على قيمة مُتدنية بعد تصحيحها

ومقارنتها بقيم سابقة فإن هذا يعني وجود رطوبة وشوائب بالمادة العازلة أما في حال ملاحظة تدني شديد بقيمة المقاومة فهذا يعني فشل العازل كإنتطاع أولي، لذلك ولأن المحولات من المُعدات ذات الأهمية القصوى لا يجب الإعتماد على أسلوب الـ (Spot Test) فقط بل يُنصح بإجراء الفحص بأسلوب

مؤشر الإستقطاب (Polarization Index - PI) للتأكد من سلامة العزل، وفي حال الحصول على قيمة مؤشر إستقطاب (PI) مُتدنية، يُنصح بعمل فحوصات أخرى سيتم الحديث عنها في نهاية هذا الفصل

5.2 الأسلوب الثاني: قراءات المقاومة المُرتبطة بالزمن - Time-Resistance : Readings DAR or AI

كما هو معلوم بأن مقاومة العازل الجيد تكون بارتفاع مُستمر على مدى فترة الفحص، أي بمعنى آخر لو قُما برسم قيمة المقاومة مع مرور زمن الفحص سَيُنتج منحى دو قِيم مقاومة ترتفع مع الزمن كما هو مُبين بالشكل (2-5) وهذا يُدل على عزل جيد. أما إذا كان المنحنى مُسطحاً ثابت مع الزمن فذلك يُدل على عزل غير جيد نتيجة للتيار المُمتص من العازل (I_A Absorption current) والذي يكون ذو قيمة مرتفعة في بداية الفحص ثم ينخفض الى أدنى قيمة له للعازل الجيد، أما للعازل الرديء فإنه يبقى ذو قيمة مرتفعة طوال فترة الفحص وهذا بدوره يُفسر عدم إرتفاع قيمة المقاومة مع الزمن للعازل الرديء.

لذلك في هذا الأسلوب يتم قسمة قراءة مقاومة العزل عند الثانية (60s) من زمن الفحص على قراءة مقاومة العزل عند الثانية (30s) من زمن الفحص أو بقسمة قراءة التيار المُتسرب عند الثانية (30s) من زمن الفحص على قراءة التيار المُتسرب عند الثانية (60s) من زمن الفحص ليُعطي ما يُسمى بمؤشر الإمتصاص (Absorption Index - AI) أو كما يُسمى بالـ (Dielectric Absorption Ratio - DAR)، والذي بدوره يُعطي إشارة على تصاعد قيمة مقاومة العازل مع الزمن كما هو مُبين بالمعادلة (2.3) حسب المراجع [Paul Gill, Electrical Power Equipment Maintenance and Testing].

$$DAR \text{ or } AI = \frac{R_{60s}}{R_{30s}} = \frac{I_{30s}}{I_{60s}} \quad (23)$$

حيث؛

$DAR \text{ or } AI$	مؤشر الإمتصاص - Dielectric Absorption Ratio or Absorption Index.
R_{60s}	قيمة مقاومة العزل عند الدقيقة الأولى من الفحص (MQ)
R_{30s}	قيمة مقاومة العزل عند الثانية (30s) من الفحص (MQ)
I_{30s}	قيمة التيار المُتسرب من خلال العازل عند الثانية (30s) من الفحص (μA).
I_{60s}	قيمة التيار المُتسرب من خلال العازل عند الدقيقة الأولى من الفحص (μA).

وتُحذر الإشارة إلى أن بعض المراجع التي تعتمد على المعايير الصينية (Chinese standards) أوردت نفس المعادلة لحساب مؤشر الإمتصاص (DAR / AI) سابقة الذكر ولكن بقسمة قراءة مقاومة العزل عند الثانية (60s) من زمن الفحص على قراءة مقاومة العزل عند الثانية (15s) من زمن الفحص عوضاً عن الثانية (30s) من زمن الفحص وكلاهما يوفي بالغرض.

5.3 الأسلوب الثالث: قراءات المقاومة المُرتبطة بالزمن - Time-Resistance

: Readings PI

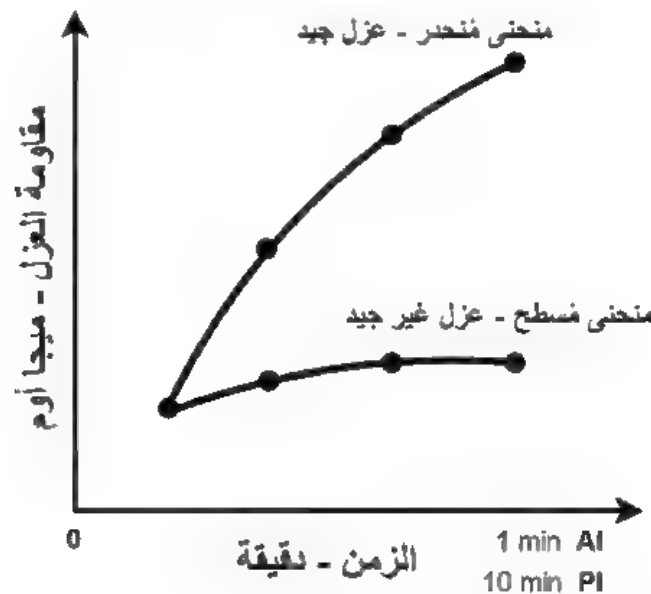
يهدف هذا الأسلوب بشكل رئيسي إلى الكشف عن وجود رطوبة في المادة العازلة، حيث أن هذا الأسلوب (PI) و الأسلوب السابق (AI) يتطابقان في المبدأ إلا أنهما يفترقان في مُدة الفحص، حيث أن هذا الأسلوب تكون مُدته (10 min) دقائق ويتم احتساب قيمة مؤشر الإستقطاب (Polarization Index - PI) وذلك بقسمة قراءة مقاومة العازل عند الدقيقة (10 min) من زمن الفحص على قراءة مقاومة العازل عند الدقيقة الأولى (1 min) من زمن الفحص حسب المعادلة (24) الواردة في معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Std C57.152-2013] أو بقسمة قراءة التيار المُتسرب عند الدقيقة الأولى من زمن الفحص (1 min) على قراءة التيار المُتسرب عند الدقيقة (10 min) من زمن الفحص.

$$PI = \frac{R_{10 \text{ min}}}{R_{1 \text{ min}}} = \frac{I_{1 \text{ min}}}{I_{10 \text{ min}}} \quad (24)$$

حيث؛

PI	مؤشر الإستقطاب - Polarization Index
$R_{10 \text{ min}}$	قيمة مقاومة العزل عند الدقيقة العاشرة من الفحص (MQ).
$R_{1 \text{ min}}$	قيمة مقاومة العزل عند الدقيقة الأولى من الفحص (MQ).
$I_{1 \text{ min}}$	قيمة التيار المُتسرب من خلال العازل عند الدقيقة الأولى من الفحص (μA).
$I_{10 \text{ min}}$	قيمة التيار المُتسرب من خلال العازل عند الدقيقة العاشرة من الفحص (μA).

كما وتُجدر الإشارة إلى أنه من مميزات هذا الأسلوب (PI) عدم حاجته لقيَم فحص سابقة ليتم مقارنتها بها وكذلك لا تؤثر درجة الحرارة والرطوبة على قيمته النهائية، حيث أن درجة الحرارة والرطوبة الحوية عند الدقيقة الأولى هي نفسها عند الدقيقة 10 من الفحص والقيمة المُقاسة (PI) هي عبارة عن نسبة (Ratio).



الشكل رقم (2-5)

ومنه يُمكن ملاحظة أن إجراء هذا الفحص باستخدام أسلوبَي الفحص (PI و AI) يُمكن من خلاله إستخلاص العلاقة بين مُقاومة العزل (Insulation Resistance) والزمن، حيث يُنصح بتسجيل قيمة مقاومة العزل عند إجراء هذا الفحص بأسلوب مؤشر الإستقطاب (PI) كل دقيقة وذلك لرسم منحنى تغيُّر المقاومة مع الزمن وملاحظة إرتفاع قيمة هذه المقاومة مع الزمن، كما هو مبين في الشكل (2-5).

ملحوظة (2-2): يتم تطبيق هذا الفحص باستخدام الأساليب (PI و AI) للكشف عن جودة المواد العازلة الصلبة (Solid dielectric) لذلك لا يُنصح بتطبيقها على المحولات الجديدة المغمورة بالزيت (New Oil Immersed Transformer) حسب توصيات معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE C57.152-2013]، وذلك لتأثير الزيت على قيمة الفحص وهذا لا يعكس وضع عزل المحول الراهن على البقيض من المولدات والمحركات الكهربائية.



بظراً للتشابه الكبير بين أسلوب الفحص (AI) ذو الدقة الواحدة و أسلوب الفحص (PI) ذو العشر دقائق، يبقى التساؤل المطروح "متى يتم إجراء هذا الفحص بأسلوب مؤشر الإمتصاص (AI) ومتى يتم إجراؤه بأسلوب مؤشر الإستقطاب (PI)؟"

يُعتبر مؤشر الإمتصاص (AI) أقل دقة في الكشف عن حالة المادة العازلة من نظيره مؤشر الإستقطاب (PI) نظراً لِقصر زمن هذا الفحص (AI) مقارنةً بنظيره (PI). لذلك فإن الفحص بهذا الأسلوب (AI) يُمكن إجراؤه في الحالات التالية:

✓ **ضيق الوقت؛** في حال ضيق الوقت يتم الفحص بالإعتماد على هذا الأسلوب (AI) ذو الدقة الواحدة كونه أكثر دقة في الكشف عن حالة العازل من قراءات الزمن القصير أو كما تُسمى بالـ (Spot Test).

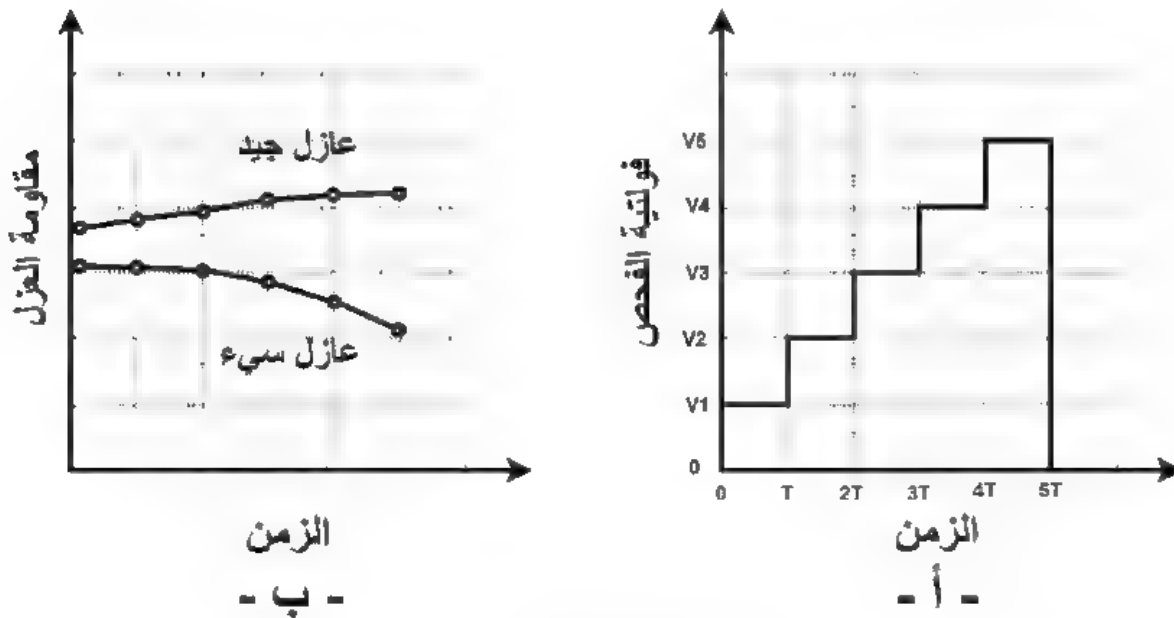
✓ **نوع جهاز الفحص؛** عند استخدام أجهزة الفحص (Megohmmeter) اليدوية (Hand-driven) فإنه من الصعب مواصلة تحريك الجهاز يدوياً لمدة عشر دقائق بهدف إستخراج مؤشر الإستقطاب (PI)، لذلك يتم الإكتفاء بعمل الفحص بأسلوب مؤشر الإمتصاص (AI).

✓ **نوع العازل المُراد فحصه؛** في حال كانت المادة العازلة ذات تيار إمتصاص (Absorption Current) يتناقص بشكل سريع، فإن ذلك يريد من نجاعة الفحص بأسلوب مؤشر الإمتصاص (AI). ومن الحدير بالذكر أنه لهذا النوع من المواد العازل عادةً ما يكون قياس مؤشر الإمتصاص (AI) أكثر دقة منه لمؤشر الإستقطاب (PI)، وذلك لثبات قيمة مقاومة العزل قبل الوصول لدقيقة من زمن الفحص مما يعني أن مقاومة العزل عند دقيقة ستكون مساوية تقريباً لمقاومة العزل عند عشر دقائق وهذا سيعطي قيمة مؤشر إستقطاب (PI) مساوٍ لـ (1) مما لا يعكس حالة العزل الحقيقية للمادة.

لذلك عادةً ما يتم الإكتفاء بإجراء هذا الفحص بأسلوب مؤشر الإستقطاب (PI) عوضاً عن مؤشر الإمتصاص (AI).

5.4 الأسلوب الرابع: قراءات المقاومة المُرتبطة بالفولتية – Step-voltage Readings :SV

وأيضاً يُسمى بفحص التدرُّج بالفولتية (DC Voltage Tip-Up Test)، عادة ما يتم الكشف عن تلوث المادة العازلة بالغبار وعيره من الملوثات كالرطوبة عبر أساليب الفحص المُرتبطة بالرمن مثل مؤشر الإمتصاص والإستقطاب (PI و AI) سابقى الذكر، أما في هذا الأسلوب فإنه يكشف عن عُيوب المادة العازلة التي تظهر مع إرتفاع فولتية الفحص مثل وجود أضرار موضعية كالثقوب أو غيرها من الأضرار الفيزيائية بالإضافة إلى الكشف عن العازل المُتقادم بالرغم من نظافة هذا العازلة وخلوه من الرطوبة، حيث يتم في هذا الأسلوب تطبيق فولتية ثابتة (DC Voltage) بشكل مُتدرِّج على المادة العازلة حتى الوصول إلى الفولتية الكاملة للفحص ومراقبة قيمة مقاومة العزل عند كل مرحلة كما هو مبين في الشكل [(2-6) (أ)]، وكما هو معلوم أن العزل الجيد يُمكن التعبير عنه بمقاومة لذلك عند إرتفاع فولتية الفحص المُطبقة على العازل لا بُد من إرتفاع قيمة التيار التسريبي وذلك للحفاظ على قيمة مقاومة العازل ثابتة، و في حال ظهور أي خلل بين قيمة إرتفاع الفولتية والتيار أثناء الفحص فإن هذا يدل على وجود مُشكلة في هذا العازل [(2-6) (ب)]. ومن هذا الأسلوب يُمكن إستخلاص العلاقة بين مقاومة العزل (Insulation Resistance) والفولتية.



الشكل رقم (2-6)

و لعهم أكثر لهذا الأسلوب سنعرض أننا قُما بتطبيق فولتية مقدارها (500V) فولت على مادة عازلة بهدف قياس مقاومة العزل لهذه المادة، من المُرجح في هذه الحالة الحصول على قيمة مقاومة عزل جيدة بالرغم من وجود فجوات داخل هذه المادة لم نتمكن من الكشف عنها، إلا أنه بعد زيادة فولتية الفحص المُطبقة مثلاً إلى (1000V) فولت يحدث تأين (Ionization) للفجوات داخل هذه المادة العازلة مما يزيد من قيمة التيار التسريبي ويُقلل من قيمة مقاومة العزل ويتيح لنا الكشف عن هذه الفجوات في المادة العازلة.



ملحوظة (2-3): عادة يتم التدرُّج في رفع قيمة الفولتية بحيث يكون زمن الخطوة متساوي لجميع الخطوات، فمثلاً لو أردنا عمل على الفحص على مدة خمس دقائق نقوم برفع مستوى الفولتية كل دقيقة من الزمن.



ملحوظة (2-4): يُنصح في بعض الأحيان أن لا تتجاوز قيمة فولتية الفحص باستخدام هذا الأسلوب أكثر من 60% من الـ (Withstanding voltage) للمحول، وكذلك أن لا تتجاوز الفولتية الإسمية للمعدات حتى لا تُلحق أية أضرار بمظومة العزل.



ملحوظة (2-5): يُنصح بإجراء هذا الفحص بأسلوب مؤشر الإستقطاب (PI) قبل القيام بهذا الأسلوب للتأكد من أن العازل قادر على تحمل الفولتية المرتفعة المُطبقة في هذا الأسلوب.

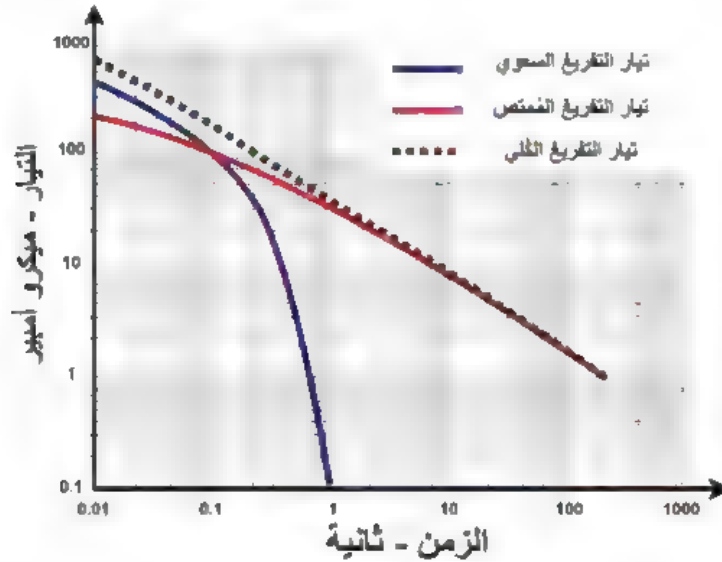
5.5 الأسلوب الخامس: قراءات تيار تفريغ العازل - Re-absorption Current or : Dielectric Discharge DD

كما تم شرحه سابقاً في فلسفة الفحص فإنه عند تطبيق فولتية ثابتة (DC Voltage) على العازل تنشأ عدة تيارات منها ما هو سَعوي لشحن مواسعة العازل (I_C) ومنها ما يتم إمتصاصه من قبل العازل لترتيب جزيئاته الداخلية (I_A) ومنها ما يتسرب من خلال المادة العازلة وعلى سطحها على شكل تيار مادي (I_L و I_S).

ولكن بعد زوال تأثير الفولتية الثابتة (DC Voltage) المُطبقة على المادة العازلة (وهو ما يتم عمله في هذا الأسلوب) فإن التيارات المادية المُتسربة من خلال العازل وعلى سطحه (I_L و I_S) تصبح قيمتهما قُرابة الصفر في وقت قليل جداً لذلك سيتم إهمالهما في هذا الأسلوب، أما فيما يخص التيار السَعوي (I_C) فإنه سوف يحفض إلى قُرابة الصفر في عدة ثواني أي حتى تقوم مواسعة العازل بالتفريغ، وكذلك الحال فيما يخص التيار المُمتص (I_A) أو كما يُسمى بالـ (Re-absorption Current) في حالتنا هذه (حالة التفريغ) ولكنه يحتاج إلى زمن أكبر من التيار السَعوي حتى يصل إلى أدنى قيمة له فقد يستغرق قرابة الدقيقة أو الدقيقتين، حيث ينشأ هذا التيار (Re-absorption Current) نتيجة لرجوع أغلب الجزيئات الخاصة بالمادة العازلة إلى ترتيبها السابق - العشوائي - أي قبل تعرضها للفولتية الثابتة (DC Voltage).

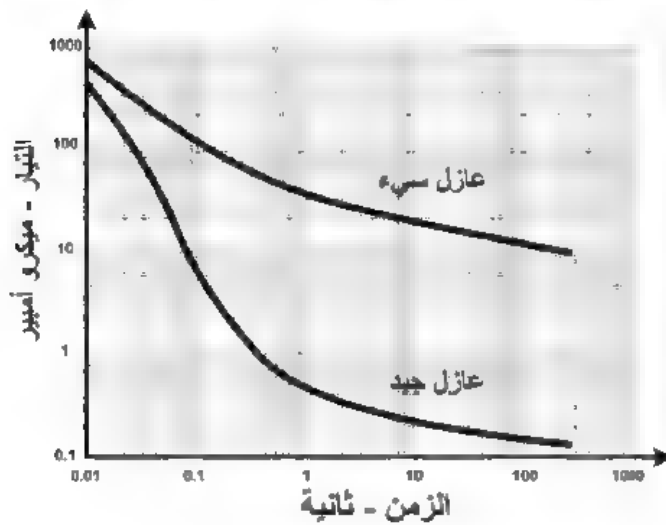
و إنطلاقاً مما تم شرحه يمكن ملاحظة أن تيارات التفريغ (Discharge Currents) التي تلي تعرُّض المادة العازل إلى فولتية ثابتة ومن ثم زوالها، تنحصر بالتيار السَعوي (I_C) و التيار المُمتص (I_A) أو كما يُسمى بالـ (Re-absorption Current) في حالة التفريغ، وبناءً عليه تم الإستفادة من هذا التيار الـ (Re-

absorption Current في الكشف عن حالة هذه المادة العازلة، فإذا كان هذا التيار ذو قيمة مرتفعة فإنه يدل على عازل ملوث بالرطوبة أو غيرها من الشوائب. والشكل (2-7) يوضح تيارات التفريغ التي تظهر مباشرة بعد زوال تأثير فولتية الفحص عن المادة العازلة.



الشكل رقم (2-7)

وهذا الأسلوب (**Dielectric Discharge - DD**) يهدف للكشف عن تقادم وتدهور المادة العازلة وكذلك وجود رطوبة أو فجوات هوائية (**Voids**) داخل المادة العازلة بالإعتماد على ظاهرة تيارات التفريغ سابقة الذكر، وعادةً ما يُستخدم هذا الأسلوب في فحص العوازل المُكوّنة من عدة طبقات (**Multilayer**) حيث يُمكن من الكشف عن إنهيار طبقة أو مجموعة من الطبقات (**Layers**) والتي قد يتعذر كشفها باستخدام أساليب الفحص السابقة، حيث وكما هو معلوم أن عوارل إختراق الفولتية



الشكل رقم (2-8)

المرتفعة (**HV bushings**) عادةً ما تتكون من عدة طبقات (**Layers**) من شأنها تقليل الإجهاد الناتج عن الفولتية وتجزئتها وتكون لكل من هذه الطبقات (**Layers**) مواسعتها الخاصة والتيار تسرب مادي خاص بها، وعند فشل واحدة من هذه الطبقات فإن قيمة المواسعة الكلية قد لا تختلف ولكن تيار التسريبي المادي الخاص بهذه الطبقة سوف يزداد على النظر من ظاهرة زيادة التيار المُمتص سابقة الذكر (**Re-absorption current**) مما يُدل على وجود فشل في إحدى الطبقات و يجعل هذا الأسلوب (**DD**) الأكثر نفعاً في الكشف عن وجود فشل في هذه الطبقات من العزل.

يوضح الشكل (2-8) السابق تيار التفريغ الكلي للمادة العازلة والذي يتناسب عكسياً مع جودة المادة العازلة.

حالياً تقوم العديد من أجهزة الفحص بعمل فحص مقاومة العازل وفقاً لهذا الأسلوب (DD) تلقائياً دون الحاجة إلى تجهيزات خاصة، فعند اختيار هذا الأسلوب يقوم جهاز الفحص بتطبيق فولتية ثابتة (DC voltage) على العازل لمدة طويلة قرابة (30 minutes) وذلك للتأكد من أن العازل قد تم شحنه تماماً أي أن تيار الشحن السعوي في أدنى قيمة له وكذلك إنتهاء إستقطاب جزيئات المادة العازلة أي أن التيار الممتص (Absorption current) في أدنى قيمة له، وبعد ذلك يتم إزالة الفولتية المطبقة على العازل وقياس تيار التفريغ لمدة دقيقة ومن ثم يتم حساب قيمة (Dielectric Discharge DD) وفقاً للمعادلة (25) الواردة في الكتيّب التفصيلي الخاص بجهاز الفحص المصنّع من قِبَل شركة (MEGGER).

$$\text{Dielectric Discharge DD} = \frac{I_{1min}}{V \cdot C} \quad (25)$$

حيث:

I_{1min} : تيار التفريغ لمدة دقيقة بالملي أمبير (mA)
 V : فولتية الفحص بالفولت (V)
 C : قيمة مواسعة العازل بالفاراد (Farad)

ملحوظة (2-6): هذا الأسلوب من الفحص (Dielectric Discharge - DD) لا يتأثر بمقدار تيار التسرب السطحي للعوارل وكذلك فولتية الفحص، ولكنه يتأثر بالحرارة لذلك يجب تسجيلها أثناء الفحص.



6. توصيلة الفحص

تختلف توصيلة الفحص وفقاً لإختلاف نوع المُعدّة (Equipment) أو الجزء من المُعدّة (Part) المُراد فحصه فيما إذا كان محول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (Two Windings) أو ثلاثي الملفات (Tertiary Windings) أو عوازل إختراق (Bushings) أو قلب حديدي لمحول (Core) أو دعائم تثبيت القلب (Core Clamp) وذلك لإختلاف منظومة العزل لكل منها كالآتي:

6.1 ملفات المحول - Transformer Windings

عند إجراء هذا الفحص على ملفات المحول لا بُد من معرفة نوع المحول فيما إذا كان ثنائي الملفات (Two Windings) أو ثلاثي الملفات (Tertiary Windings)، حيث تختلف توصيلة الفحص وفقاً لنوع هذا المحول لتكون كالآتي:

● المحولات ثلاثية الأطوار ثنائية الملفات - Three Phase Two Windings

تكون أنماط الفحص لهذا النوع من المحولات وفقاً للجدول (2-2) والأشكال التالية توضح التوصيلة لكل نمط:

الجدول رقم (2-2)

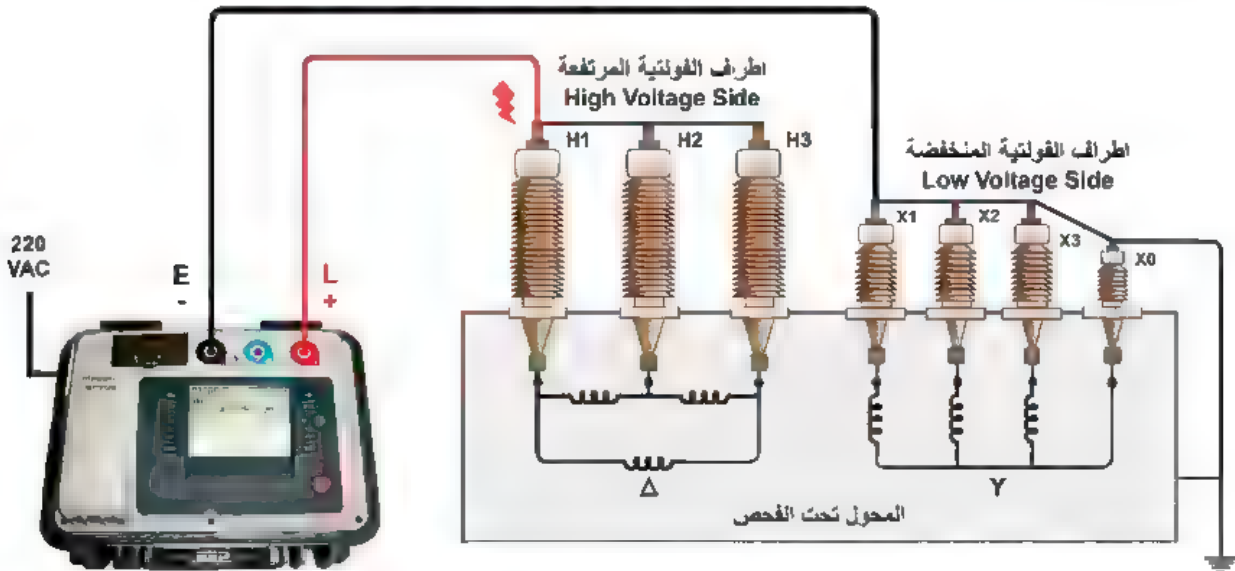
الرقم	أطراف القياس	الرقم	أطراف القياس
1	HV - LVG	4	LV - HVG
2	HV - G	5	LV - G
3	HV - LV		

حيث؛

HV : ملفات الفولتية المرتفعة.
LV : ملفات الفولتية المنخفضة.
G : الأرضي (جسم المحول).

○ الفحص بين ملفات الفولتية المرتفعة من جهة وملفات الفولتية المنخفضة والأرضي من جهة أخرى (HV to LVG):

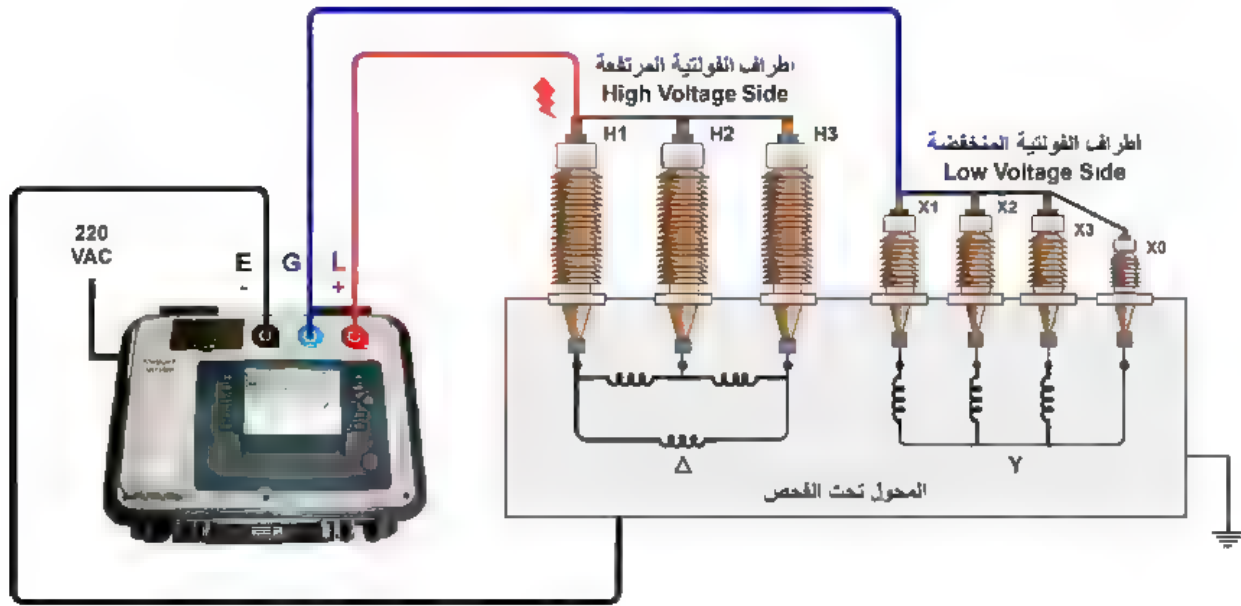
حيث يتم قصر (Short circuit) أطراف أطوار ملفات الفولتية المرتفعة (H1 و H2 و H3 و H0 إن وجد) مع بعضها وكذلك يتم قصر (SC) أطراف أطوار ملفات الفولتية المنخفضة (X1 و X2 و X3 و X0 إن وجد) مع بعضها ومع الأرضي، ثم يتم توصيل طرف جهاز الفحص الموجب (L) أو (+) بأطراف ملفات الفولتية المرتفعة وتوصيل طرف جهاز الفحص السالب (E) أو (-) بأطراف ملفات الفولتية المنخفضة الموصولة مع الأرضي كما هو موضح في الشكل (2-9).



الشكل رقم (2-9)

○ الفحص بين ملفات الفولتية المرتفعة من جهة و الأرضي من جهة أخرى مع إزالة تأثير ملفات الفولتية المنخفضة (HV to G):

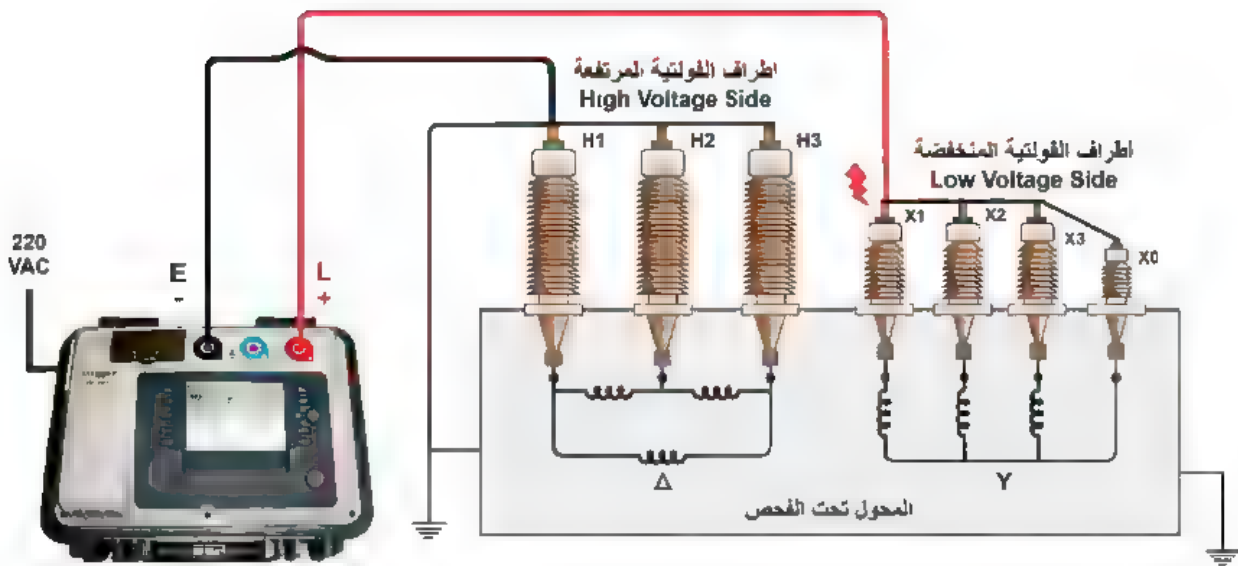
حيث يتم قَصْر (SC) أطراف أطوار ملفات الفولتية المرتفعة (H1 و H2 و H3 و H0 إن وجد) مع بعضها وكذلك يتم قَصْر (SC) أطراف أطوار ملفات الفولتية المنخفضة (X1 و X2 و X3 و X0 إن وجد) مع بعضها، ثم يتم توصيل طرف جهاز الفحص الموجب (L) (+) بأطراف ملفات الفولتية المرتفعة و توصيل طرف جهاز الفحص السالب (E) (-) بجسم المحول (الأرضي) مع مراعاة توصيل طرف جهاز الفحص (G) بأطراف ملفات الفولتية المنخفضة كما هو موضح في الشكل (2-10)



الشكل رقم (2-10)

○ الفحص بين ملفات الفولتية المنخفضة من جهة وملفات الفولتية المرتفعة والأرضي من جهة أخرى (LV to HVG):

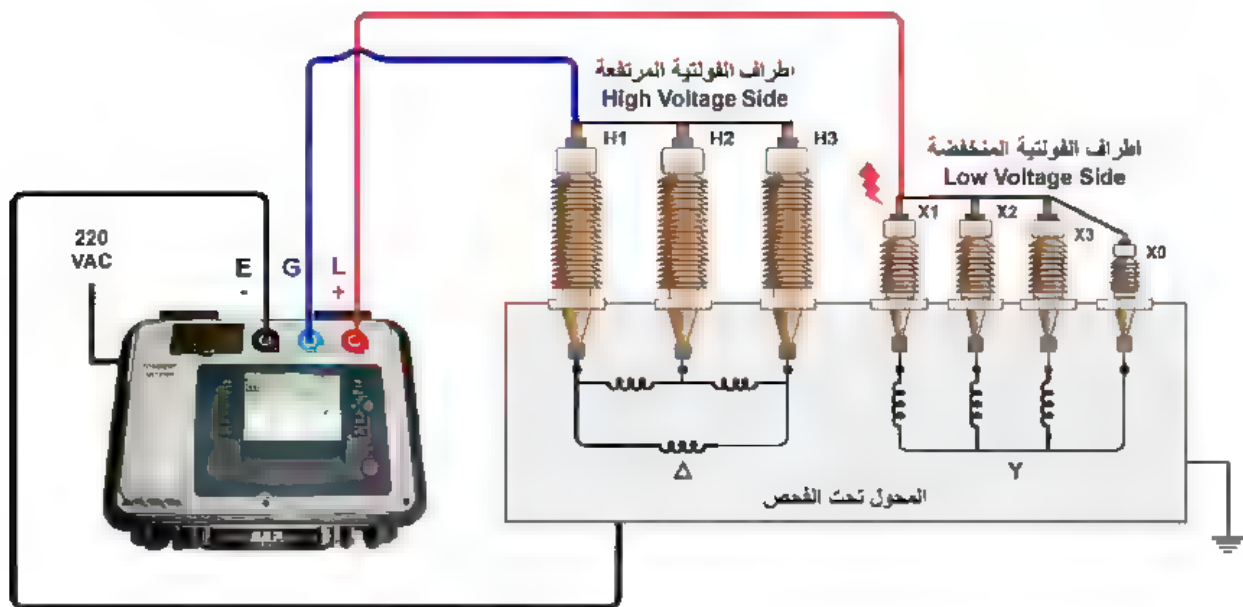
حيث يتم قَصْر (SC) أطراف أطوار ملفات الفولتية المنخفضة (X1 و X2 و X3 و X0 إن وجد) مع بعضها وكذلك يتم قَصْر (SC) أطراف أطوار ملفات الفولتية المرتفعة (H1 و H2 و H3 و H0 إن وجد) مع بعضها ومع الأرضي، ثم يتم توصيل طرف جهاز الفحص الموجب (L) (+) بأطراف ملفات الفولتية المنخفضة و توصيل طرف جهاز الفحص السالب (E) (-) بأطراف ملفات الفولتية المرتفعة الموصولة مع الأرضي كما هو موضح في الشكل (2-11).



الشكل رقم (2-11)

○ الفحص بين ملفات الفولتية المنخفضة من جهة و الأرضي من جهة أخرى مع إزالة تأثير ملفات الفولتية المرتفعة (LV to G):

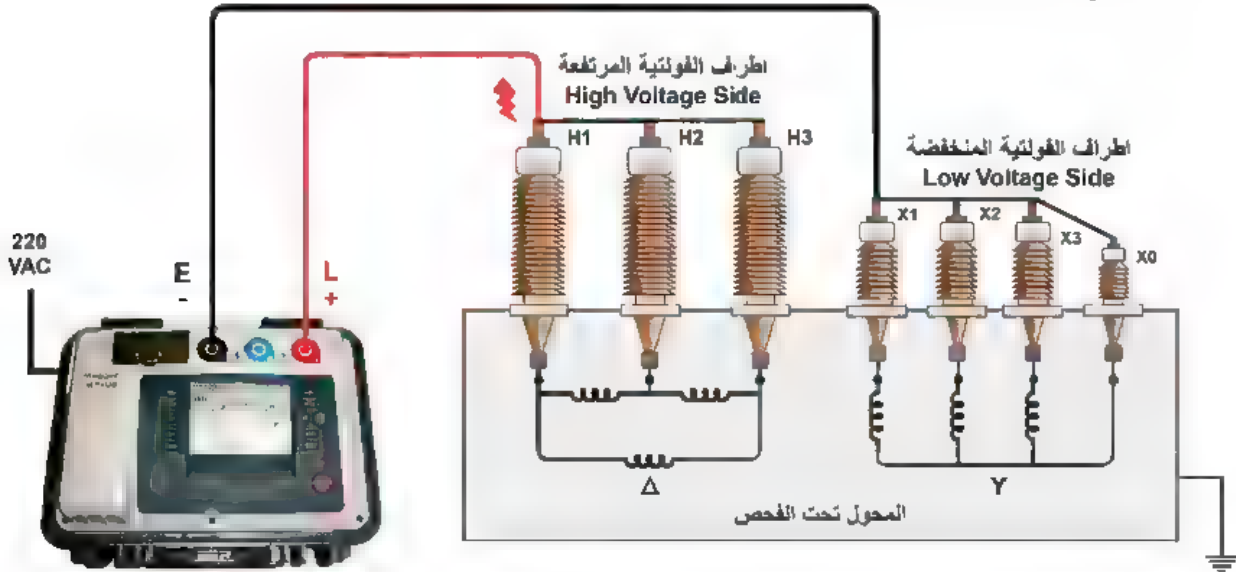
حيث يتم قصر (SC) أطراف أطوار ملفات الفولتية المنخفضة (X1 و X2 و X3 و X0 إن وجد) مع بعضها وكذلك يتم قصر (SC) أطراف أطوار ملفات الفولتية المرتفعة (H1 و H2 و H3 و H0 إن وجد) مع بعضها، ثم يتم توصيل طرف جهاز الفحص الموجب (L) (+) بأطراف ملفات الفولتية المنخفضة و توصيل طرف جهاز الفحص السالب (E) (-) بجسم المحول (الأرضي) مع مراعاة توصيل طرف جهاز الفحص (G) بأطراف ملفات الفولتية المرتفعة كما هو موضح في الشكل (2-12).



الشكل رقم (2-12)

○ الفحص بين ملفات الفولتية المرتفعة من جهة وملفات الفولتية المنخفضة من جهة أخرى (HV to LV):

حيث يتم قصر (SC) أطراف أطوار ملفات الفولتية المرتفعة (H1 و H2 و H3 و H0 إن وجد) مع بعضها وكذلك يتم قصر (SC) أطراف أطوار ملفات الفولتية المنخفضة (X1 و X2 و X3 و X0 إن وجد) مع بعضها، ثم يتم توصيل طرف جهاز الفحص الموحد (L) (+) بأطراف ملفات الفولتية المرتفعة وتوصيل طرف جهاز الفحص السالب (E) (-) بأطراف ملفات الفولتية المنخفضة كما هو موضح في الشكل (2-13).



الشكل رقم (2-13)

المحولات ثلاثية الأطوار ثلاثية الملفات - Three Phase Tertiary Windings

تكون أنماط الفحص لهذا النوع من المحولات وفقاً للجدول (2-3) التالي:

الجدول رقم (2-3)

الرقم	أطراف القياس	الرقم	أطراف القياس
1	HV - LVTVG	5	HMLV - TVG
2	LV - HMTVG	6	HMTV - LVG
3	TV - HMLVG	7	LVTV - HVG
4	HMLVTV - G		

حيث:

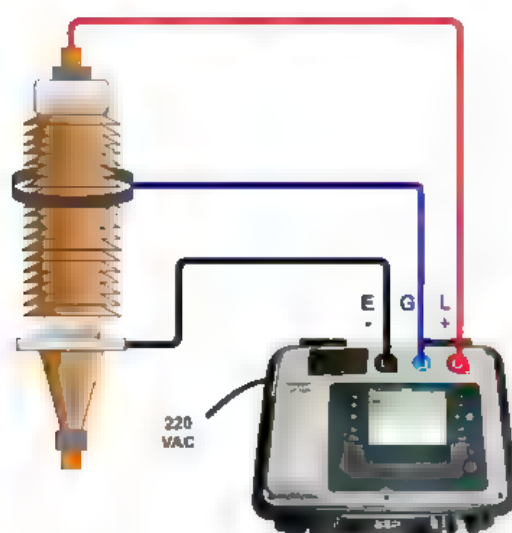
- HV : ملفات الفولتية المرتفعة.
- LV : ملفات الفولتية المنخفضة رقم (1).
- TV : ملفات الفولتية المنخفضة رقم (2).
- G : الأرضي (جسم المحول).



ملحوظة (2-7): الفحوصات بإتباع الأنماط سابقة الذكر تقيس مقاومة العزل للملفات وعوازل الإختراق معاً (Transformer Bushings).

6.2 عوازل الإختراق أو الجُلب – Bushings

في حال كانت عوارل الإختراق مُنفصلة عن المحول (قبل تركيبها) وكما هو الحال بالنسبة لملفات المحول فإن هذا الفحص يُمكن تطبيقه على هذا النوع من العوارل (Transformer Bushings) وذلك للكشف عن حالة نظام العزل الخاص بها، ويتم توصيل جهاز الفحص مع عازل الإختراق كما هو موضح في الشكل (2-14).



الشكل رقم (2-14)

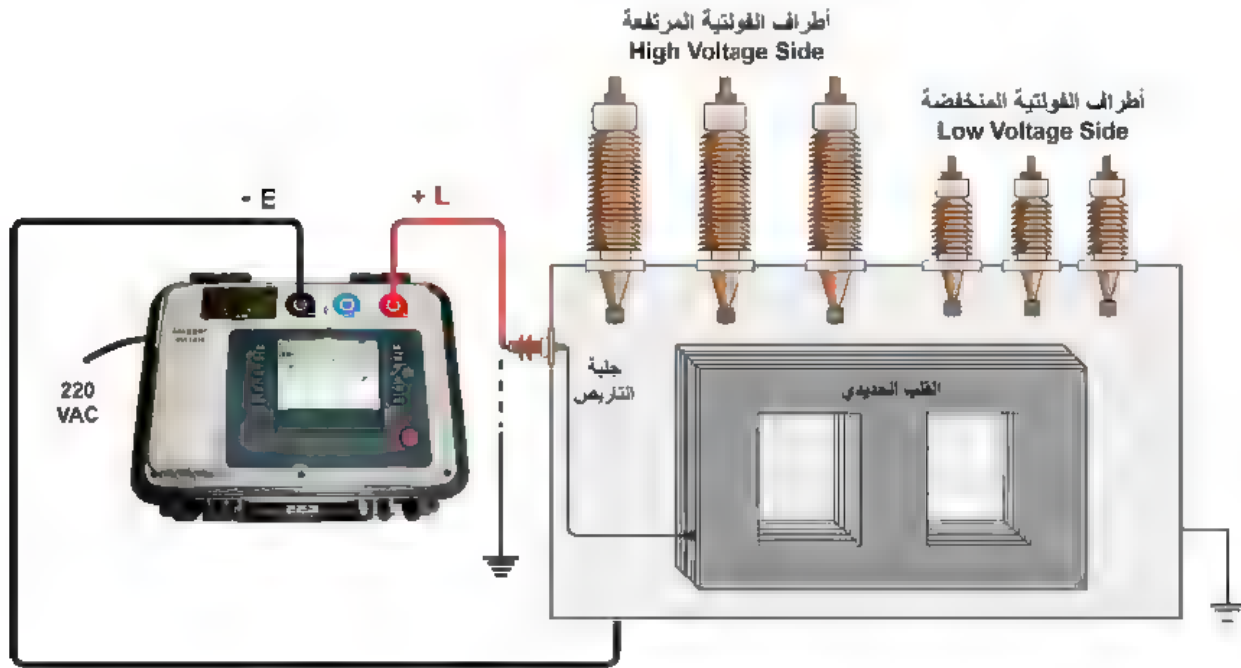
6.3 القلب الحديدي – Iron Core

كما تم شرحه في الفصل الأول فإن القلب الحديدي للمحول يكون موصول بالأرض من خلال عازل إختراق أو كما تُسمى جُلبة التأسيس (Core Grounding Bushing) وذلك للتخلص الفولتيات غير المرغوب بها والتي تنشأ بين مجموعات الصفائح لهذا القلب، بحيث يتم تأريضه من نقطة واحدة فقط بموصل نحاسي لتجنب حدوث تيارات دوّارة (Circulating currents) بالإضافة إلى تأمين ممر لتيارات العطل الخاصة بالقلب أو ما يُسمى بال (Electrical Fault path) للرجوع لمصدرها منعاً لظهور الفولتيات المرتفعة المصاحبة للتيارات العطل مما قد يؤدي المواد العزلة الخاصة بهذا القلب، لذلك يُنصح بعمل هذا الفحص للقلب الحديدي بشكل روتيني خلال فترة توقف المحول أثناء الصيانة الشاملة (Major Inspection) وبعد فترة قصيرة من كهربة المحول (Transformer energization) للمرة الأولى بالموقع وكذلك بعد عمليات الصيانة أو التعديل التي من شأنها التأثير على نظام العزل الخاص بهذا القلب، أما بشكل تشخيصي فإنه يُنصح بعمل هذا الفحص في حال إرتفاع درجة حرارة المحول أو ظهور بعض الغازات بالزيت وخاصة غازات إحماء المعدن سابقة الذكر فإنه قد يكون السبب فشل في نظام العزل الخاص بالقلب الحديدي للمحول مما يؤدي لوجود نقطة أو نقاط تأريض للقلب

الحديدي من أكثر من مكان غير المكان المحصص لذلك (عبر جُلبة التأريض) مُسبباً تيارات دَوّارة (Circulating currents) من شأنها رفع درجة حرارة المحول.

وعادةً ما يتم إجراء هذا الفحص بين القلب الحديدي من جهة والأرضي من جهة أخرى (Core to Ground) وذلك للتأكد من سلامة نظام العزل الرئيسي الخاص بهذا القلب، و أيضاً يُمكن إجراء هذا الفحص بين القلب الحديدي من جهة ودعائم تثبيت القلب والأرضي من جهة أخرى (Core to Core) (Clamp + Ground).

الشكل (2-15) يوضح توصيلة الفحص الخاصة بالقلب الحديدي (Core to Ground)، بحيث يتم فصل كابل التأريض عن عازل الإختراق أو كما يُسمى جُلبة التأريض (Grounding Bushing) ومن ثم وصل طرف جهاز الفحص الموجب (L) (+) مع طرف عازل إختراق أو كما تُسمى جُلبة التأريض (Grounding Bushing) الخاصة بالقلب الحديدي (بعد فصل الجُلبة عن الأرضي)، ويتم وصل طرف جهاز الفحص السالب (E) (-) بالأرضي أو جسم المحول.



الشكل رقم (2-15)

في حال تبيين عطل في عزل القلب (وجود نقاط تأريض أخرى للقلب الحديدي غير النقطة المخصصة لذلك) وبعد مراسلة الشركة المُصنعة لهذا المحول (OEM) يُمكن القيام بأحد الإجراءات التصحيحية التالية:

✓ إضافة مقاومة مقدارها بضعة كيلو أوم على الخط الواصل بين القلب الحديدي والأرض والتي من شأنها الحد من التيارات الدَوّارة في حاول تكونها. حيث أن هذا الإجراء لا يقوم بإزالة المشكلة من الأساس وإنما يخفف من تأثيرها حسب ما وَرَدَ في معايير مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Std C57.152-2013]

✓ يتم الطرق على خزان المحول مما يولد إهتزازات من شأنها إزالة نقطة التأريض غير المرغوب بها حسب ما ورد في [Air Force Handbook, Field Guide for Inspection, Evaluation, and Maintenance Criteria for Electrical Transformers 32-1282V2]، و تُعد هذه الطريقة من الطرق القديمة والتي لا يُنصح بها البتة.

✓ استخدام طريقة الحرق (Burn off)، وذلك بحرق تيار ثابت أو متردد في القلب مع مراعاة أن لا يتجاوز قيمة معينة مثل 40 أو 50 أمبير بشكل مُتدرّج حسب ما وَرَدَ في [Bureau of Reclamation, Transformer Maintenance FIST 3-30]، حيث يقوم هذا التيار بحرق وإزالة نقطة التأريض غير المرغوب بها. و تُعد هذه الطريقة من الطرق القديمة ففي بعض الأحيان تنجح في حل المشكلة و في أحيان أخرى لا تنجح وقد تتسبب بزيادة المشكلة، لذلك يجب التواصل مع مُصنِّع المحول (OEM) قبل استخدام هذه الطريقة.

كما وتُجدر الإشارة إلى أن مشكلة ظهور نقاط تأريض متعددة للقلب الحديدي تكون ذات تأثير كبير على القلب الحديدي ثلاثي الأعمدة أو ما يُسمى بالـ (Core Type)، أم للقلب الحديدي من النوع خماسي الأعمدة أو كما يُسمى بالـ (Shell Type) فإن هذه المشكلة في القلب لا تُعتبر ذات أهمية كبيرة [Air Force Handbook, Field Guide for Inspection, Evaluation, and Maintenance Criteria for Electrical Transformers 32-1282V2].

ملحوظة (2-8): المحولات ثلاثية الطور ذات القلب الحديدي من النوع خماسي الأعمدة أو كما يُسمى بالـ (Shell Type) والمُصنَّعة قبل العام (1997) لا تحتوي على عازل إختراق تأريض ظاهر (Grounding Bushing) يُمكن الوصول إليه بسهولة، لذلك قد يتعذر القيام بهذا الفحص. في هذه الحالة يجب التواصل مع المُصنِّع في حال وجود دلائل تُشير على وجود عطل في هذا القلب الحديدي [IEEE Std C57.152-2013].



ملحوظة (2-9): من الأعطال الأكثر إنتشاراً هي وجود عطل أرضي على الخط والواصل بين القلب الحديدي و الأرض، بحيث يكون مكان التأريض (العطل) قريب من عازل الإحتراق أو ما يُسمى جُلبة تأريض القلب (Core Grounding Bushing)، وفي هذه الحالة يُمكن للمحول الإستمرار بالعمل دون مخاوف من تَكُون تيارات دَوَّارة ذات تأثير كبير.

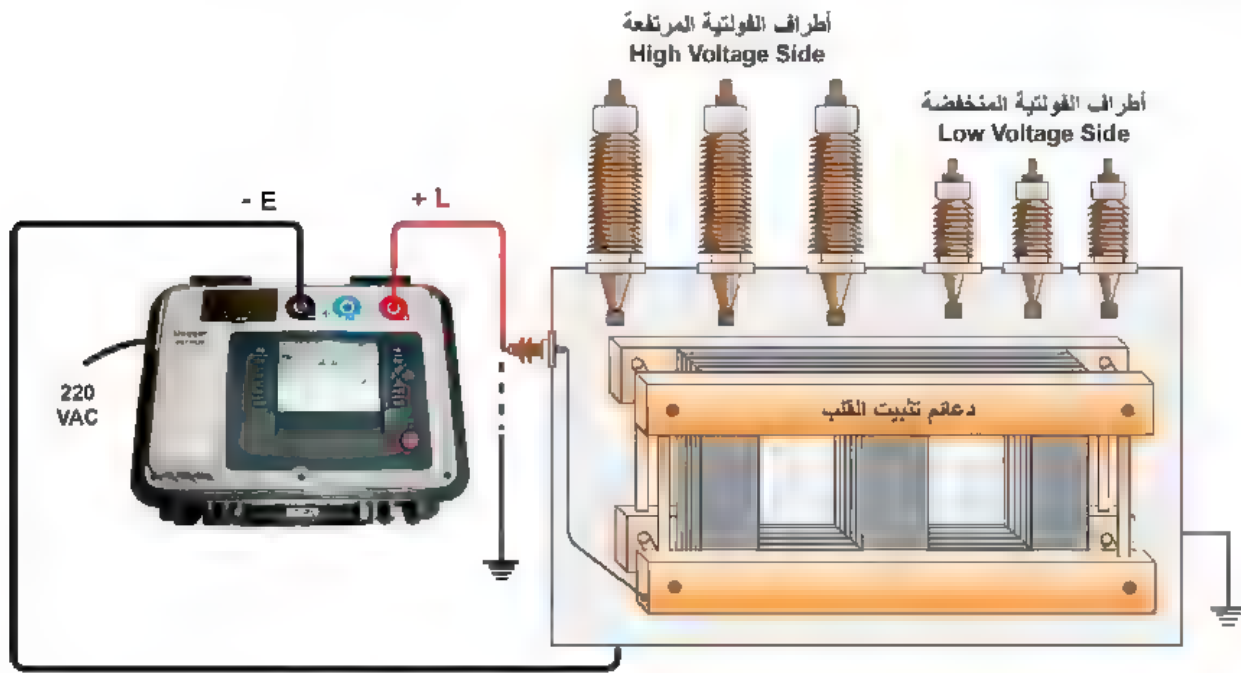


6.4 دعائم تثبيت القلب – Core Clamp

بما أن دعائم التثبيت الخاصة بالقلب الحديدي (Core Clamp) تتكون من أجزاء معدنية وكما هو معلوم أنها تقع في مرمى الفيض المُتسرب من القلب الحديدي على عرار القلب الحديدي نفسه، كان لزاماً عزل هذه الدعائم عن الأرض وتأريضها من نقطة واحدة فقط كما هو الحال في القلب الحديدي ولأسباب ذاتها. لذلك يُمكن أيضاً تطبيق فحص مقاومة العزل (Insulation Resistance - IR) على

هذه الدعائم، وذلك بقياس مقاومة العزل بين دعائم التثبيت والأرض (Core Clamp to Ground) أو بين دعائم التثبيت والقلب الحديدي (Core Clamp to Core + Ground).

الشكل (2-16) يوضح توصيلة الفحص الخاصة بدعائم التثبيت (Core Clamp to Ground)، بحيث يتم فصل كيبيل التأريض عن عازل الإحتراق أو كما يُسمى جُلبة التأريض (Grounding Bushing) ومن ثم وصل طرف جهاز الفحص الموجب (L) (+) مع طرف جلبة التأريض الخاصة بدعائم التثبيت (Core Clamp Grounding Bushing) ثم يتم وصل طرف جهاز الفحص السالب (E) (-) بالأرضي أو حسم المحول كما هو موضح في الشكل (2-16).



الشكل رقم (2-16)

7. خطوات الفحص

الخطوات التالية تم وضعها بالإعتماد على المعايير الخاصة بمعهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE C57.152-2013] بالإضافة إلى الخبرة العملية في عمل هذا الفحص في الموقع:

7.1 عزل المحول كهربائياً (Transformer De-energization) مع مراعاة تطبيق نظام (إقفال مصادر الطاقة ووضع لافتات عليها) أو ما يُسمى بنظام التقاقل (Lock-out Tag-out LOTO).

7.2 عزل نظام مكافحة الحريق بالماء (أو كما يُسمى نظام تبريد خزان المحول ومع إنتشار الحريق) الخاص بالمحول المراد فحصه خشية عمل النظام بشكل خاطئ أثناء إجراء الفحص مما قد يؤدي لمخاطر القوس الكهربائي وما ينطوي عليه من مخاطر على الأشخاص أو المحول خاصة أثناء تطبيق الفولتية على المحول أو قد يؤدي الماء لتلف جهاز الفحص نفسه.

7.3 تطبيق كافة إجراءات السلامة الخاصة بإجراء الفحوصات الكهربائية المُضمنة في معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Recommended Practices for Safety in High-

[ANSI National Voltage and High-Power Testing] و المعهد الوطني الأمريكي للمعايير
[Electrical Safety Code] و مُنظمة إدارة السلامة والصحة المهنية [OSHA Specifications
for Accident Prevention Signs and Tags]

7.4 التأكد من توصيل خزان المحول (Transformer Tank) والقلب الحديدي (Iron Core) بالأرض طيلة مدة الفحص.

7.5 فتح أطراف المولتية المنخفضة (LV side terminals) والفولتية المرتفعة (HV side terminals) وذلك بإزالة الموصلات عنها (Removing HV&LV Cables or Busbars) وكذلك الحال بنقطة التعادل (Neutral point) للمحول إن وجدت.

تحذير: يجب تأريض كوابل الفولتية المرتفعة إما عبر مُستعزلات التأريض الثابتة (Earthing Dis-connector) أو المتحركة (Portable) قبل البدء بفك هذه الكوابل عن عوازل إختراق المحولات (Bushings)، وذلك لما قد تحويه من فولتية حثية (Induction voltage) ناتجة عن المُعدات أو الحطوط الهوائية (Overhead Lines - OHL) المجاورة للمحول المُراد فحصه والمشحونة بفولتيات مرتفعة.



7.6 فصل أية أجزاء ثانوية مُرتبطة بملفات المحول من محولات فولتية (Voltage transformers) و حارفة (مانعة) الصواعق (Surge arresters) و المُكثفات (Capacitors) أو أية عدادات (Meters) وغيرها من الأنظمة الثانوية كوجود المُتحسسات الخاصة بقياس التفريغ الجزئي (PD Couplers).

7.7 تفريغ الشحنات المُخزنة بملفات المحول قبل الفحص (Trapped Charges) وذلك بعمل قِصر للملفات (Short circuit) وتأريضها لمدة من الزمن كما سيتم شرحه في آخر الفصل.

7.8 توصيل أطراف أطوار الفولتية المرتفعة (HV terminals) مع بعضها، وكذلك أطراف أطوار الفولتية المنخفضة (LV terminals)، و التأكد من أن أسلاك التوصيل غير ملاصقة لجسم المحول أو الأرض.

ملحوظة (2-10): في حال كانت ملفات المحول موصولة على شكل نجمة (Star - Y) يجب توصيل نقطة التعادل (Neutral point H0 or X0) مع الأطراف الخاصة بها كما هو مبين في النقطة السابقة.



تحذير: يجب تجنب ترك أطراف المحول مفتوحة (Open Circuit) على أي حال دون عمل وصلة قِصر (Short circuit) بين هذه الأطراف طيلة مدة الفحص.



7.9 إحتيار جهاز فحص ميجا أوميتر (Megohmmeter) مناسب كالاتي:

- ✓ ذو مستوى فولتية فحص ثابتة (DC Voltage) مُناسب، عادة أجهزة الفحص ذات مستوى الفولتية (5kV) كيلو فولت تُعتبر كافية.
- ✓ ذو تدرج مقاومة مُناسب، عادة أجهزة الفحص ذات تدرج المقاومة بالميجا أوم تُعتبر كافية.
- ✓ إحتواء جهاز الفحص على الأسلوب المُراد إستخدامه في الفحص (IR, DAR/AI, PI, SV or DD).

7.10 عمل توصيلة الفحص المناسبة كما تم شرحه مسبقاً في فقرة توصيلة الفحص.

7.11 تشغيل جهاز الفحص وتحديد مستوى فولتية الإحتبار الثابتة (DC Test Voltage) للمحول، حيث عادة ما تكون فولتية الفحص للملفات (5000V - 1000V) فولت حسب معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE C57.152-2013]، وكذلك أوردت المعايير الخاصة بالمعهد الوطني الأمريكي للمعايير [ANSI/NETA ATS-2009 Table100.5] الجدول (2-4) والذي يوضح فولتيات الفحص المناسبة للملفات تبعاً للفولتية التشغيلية لهذه الملفات.

الجدول رقم (2-4)

مقدار الفولتية المترددة التشغيلية لملف المحول (AC Voltage)	أقل قيمة فولتية فحص (DC Voltage)
0 - 600 فولت	1000 فولت
601 - 5000 فولت	2500 فولت
أكثر من 5000 فولت	5000 فولت

وعند تطبيق هذا الفحص على القلب الحديدي يكون مستوى الفولتية المُطبقة (500V) فولت فقط حسب المعايير الصادرة عن المعهد الوطني الأمريكي للمعايير [ANSI/NETA ATS-2009]، وأن لا تزيد الفولتية المُطبقة عن (1000V) فولت حسب المعايير الصادرة عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Std C57.152-2013].

7.12 نقوم بالفحص بين مجموعة الملفات والأرض أو بين مجموعتي الملفات أو بين القلب الحديدي والأرض أو دعائم تثبيت القلب والأرض وفقاً للخطوات الموضحة في الملحق رقم (2-1) في حال إستخدام جهاز الفحص (Insulation Tester MT 1025 10kV) المُصنَّع بواسطة شركة (MEGGER)، و الملحق (2-2) في حال إستخدام جهاز الفحص (TeraOhmXA MI 3210 10kV) المُصنَّع بواسطة شركة (METREL)، و الملحق (2-3) في حال إستخدام جهاز الفحص (1555 10kV insulation tester) المُصنَّع بواسطة شركة (FLUKE).

7.13 بعد الإنتهاء من الفحص يتم وصل الملفات بالأرضي لفترة من الزمن لحين التخلص من شحنة الملفات أو ما يُسمى بالـ (Trapped Charges).

تحذير: لا تُقَم بعمل هذا الفحص للمحولات المغمورة بالزيت (Oil Immersed Transformers) في حال كانت مُفرغة من الزيت، لأن قيمة مقاومة العزل بوجود الهواء أقل بكثير من قيمة المقاومة بوجود زيت المحول مما يؤدي إلى قيمة غير دقيقة للفحص وخوفاً من حدوث وميض قوس كهربائي (Flashover) مع الأرض.



تحذير: لا تُقَم بعمل هذا الفحص للمحولات المغمورة بالزيت (Oil Immersed Transformer) في حال كان فارغ من الزيت ومُفرغ من الهواء أيضاً (Under Vacuum)، وذلك خوفاً من حدوث وميض قوس كهربائي (Flashover) مع الأرض.



تحذير: لا تستخدم جهاز الميجا أوميتر (Megohmmeter) في الأجواء القابلة للانفجار (Explosive atmosphere) أو في الاجواء الرطبة.



تحذير: يجب إيقاف الفحص بسرعة في حال ملاحظة إزداد كبير في قيمة التيار التسريبي دون إستقرار.



تحذير: لا تُقَم بإزالة أسلاك الفحص (Test Leads) عن المحول بعد إنتهاء الفحص مباشرة لتجنب حدوث شرارة قوس كهربائي (Arc flash)، بل يجب إنتظار جهاز المحص لحين إنتهاؤه من تفريغ شحنة الملفات حيث يُقدر زمن التفريغ من (30s - 60s) ثانية.



ملحوظة (2-11): لغايات التأكد من سلامة أسلاك الفحص (Test leads) وعدم وجود قطع في هذه الأسلاك والذي من شأنه إعطاء نتيجة فحص مقبولة غير واقعية، يُمكن إجراء فحص أولي عن طريق وصل أسلاك الفحص مع بعضها (وصل الطرف الموجب بالسالب) وتشغيل الجهاز للتأكد من أن الجهاز لن يقوم ببناء فولتية من الأساس وأن مقاومة العزل قرابة الصفر.



8. تصحيح القيمة المُقاسة

يُعد هذا الفحص من الفحوصات التي تتأثر قيمتها بتغيُّر درجة حرارة المادة العازلة تحت الفحص والتي تتمثل بدرجة الزيت للمحولات المغمورة بالزيت بعد إستقرار درجة حرارة المحول كما تم ذكره مُسبقاً، لذلك ولغايات مُقارنة قِيَم المقاومات الناتجة عن هذا الفحص بقيَم فحوصات القُبول المصنعية

(Factory Acceptance Test – FAT) أو الموقعية (Site Acceptance Test – SAT) أو غيرها من القيم المرجعية كنتاج الفحوصات الروتينية السابقة (Routine Test) لهذا الفحص، يجب تصحيح قيم هذه المقاومات لدرجة الحرارة المرجعية القياسية وهي عادةً (20°) درجة مئوية حسب المعهد الوطني الأمريكي للمعايير (ANSI) وغيرها من المعايير العالمية، وذلك باستخدام الطرق التالية:

8.1 حسب الخبرة – Role of thumb

حسب التجربة والخبرة المُسبقة يُمكن القول أن إرتفاع درجة حرارة المادة العارلة بمقدار عشر درجات مئوية من شأنه تقليل قيمة مقاومة العزل إلى النصف والعكس صحيح.

مثال: إذا كانت قيمة مقاومة العزل (100 MΩ) ميجا أوم عند درجة الحرارة المئوية (30°) فإن قيمة مقاومة العزل عند درجة الحرارة المئوية (20°) تساوي (200 MΩ) ميجا أوم

ملحوظة (2-12): هذه الطريقة غير دقيقة كفاية خاصة إذا لم تكن الحرارة التي أُجري عندها الفحص من مضاعفات العدد عشرة.



8.2 حسابياً – Mathematically

وذلك بتطبيق المعادلة التالية حسب المعهد الوطني الأمريكي للمعايير [ANSI/NETA ATS-2009]:

$$R_{20} = R_T \cdot k_T \quad (26)$$

حيث:

R_{20} : قيمة المقاومة عند درجة حرارة (20°) درجة مئوية.

R_T : قيمة المقاومة المقاسة عند درجة حرارة T.

k_T : معامل تصحيح المقاومة و الذي يمكن إستخراج قيمته بطريقتين:

- الطريقة الأولى : حسابياً وذلك بتطبيق المعادلة التالية حسب المعهد الوطني الأمريكي للمعايير [ANSI/NETA ATS-2009]:

$$k_T = 0.2525 \cdot e^{0.0689T} \quad (27)$$

حيث:

T : درجة الحرارة المئوية (C°) أثناء إجراء الفحص.

- الطريقة الثانية : يُمكن إيجاد قيمة معامل التصحيح (k_T) بالرجوع الى الجدول (2-5) والصادر عن المعهد الوطني الأمريكي للمعايير [ANSI/NETA ATS-2009 Table 100.14] في حال كانت

درجة الحرارة التي أجري عندها الفحص من مضاعفات العدد خمسة وذلك للمعدات التي تحتوي على عازل مغمور بالزيت كما هو الحال في المحولات.

الجدول رقم (2-5)

معامل التصحيح (k_T)	درجة الحرارة (°C)	معامل التصحيح (k_T)	درجة الحرارة (°C)
11.20	55°	0.125	-10°
15.85	60°	0.180	-5°
22.40	65°	0.25	0°
31.75	70°	0.36	5°
44.70	75°	0.50	10°
63.50	80°	0.75	15°
89.789	85°	1.00	20°
127.00	90°	1.40	25°
180.00	95°	1.98	30°
254	100°	2.80	35°
259.15	105°	3.95	40°
509	110°	5.60	45°
		7.85	50°

9. تحليل نتائج الفحص

قبل الحوض في حيثيات تحليل نتائج فحص مقاومة العزل للمحولات المغمورة بالزيت (Oil Immersed Transformers) وجب التنويه إلى أن الزيت المتواجد داخل المحول يؤثر بقدر كبير على قيمة مقاومة العزل فمثلاً المحولات ذات زيت العزل من الإسترات الطبيعية (Natural Esters) تكون ذو قيمة مقاومة عزل أقل منها للمحولات المغمورة بالزيت المعدني (Mineral Oil)، ومن جهة أخرى قيمة مؤشر الإستقطاب (PI) عادة ما تكون قريبة من العدد (1) لزيت العزل الخاصة بالمحولات مما يعني أن مؤشر الإستقطاب الخاص بملفات المحول قد يتأثر بمؤشر الإستقطاب الخاص بريت المحول مما يحول دون الحصول على قيمة مؤشر إستقطاب تعكس الحالة الحقيقية لعزل ملفات المحول لذلك من الصعب وضع قِيم مرجعية أو دُنيا لهذا الفحص.

كما وتجدر الإشارة إلى بعض القِيم التقريبية لتحليل هذا الفحص لملفات المحول والقلب الحديدي و عوازل الإختراق و دعائم التثبيت التي تم التوصل إليها عملياً وحساسياً وفقاً لبعض المعايير والمراجع العالمية حسب الأسلوب المُتبّع في الفحص:

9.1 ملفات المحول – Transformer Winding

لتحليل نتائج هذا الفحص لملفات المحول وفقاً لأسلوب الفحص المُتبع يُمكن إيجاد الآتي:

• قراءات الزمن القصير – Short Time Readings or Spot Test

من المُمكن تحليل نتائج الفحص الخاصة بهذا الأسلوب بعمل (Trend) ومقارنته بقراءات سابقة لنفس المحول كنتائج فحوصات القبول المُصنعية (Factory Acceptance Test – FAT) أو المُوقعية (Site Acceptance Test – SAT) أو نتائج الفحوصات الروتينية السابقة (Routine Test) مع مراعاة أن تكون قيمة فولتية الفحص نفسها للفحوصات السابقة والحالية لغايات المقارنة. كما ويُمكن تحليل نتائج الفحص بهذا الأسلوب بإتباع إحدى الطرق التالية:

○ حسب الخبرة – Rule of Thumb

أوردت بعض المراجع مثل [Paul Gill, Electrical Power Equipment Maintenance and Testing] أنه في حال الحصول على قيمة مقاومة عزل مقدارها (1MΩ) ميغا أوم لكل (1kV) كيلوفولت من فولتية الفحص مضافاً إليها (1MΩ) يُمكن كهربية المحول (Transformer Energization) وإعادة العمل بشكل آمن، أي أنه إذا تم فحص محول بتطبيق فولتية ثابتة (DC Voltage) مقدارها (5kV) كيلوفولت و كانت نتيجة الفحص (6MΩ) ميغا أوم، تُعتبر هذه أقل نتيجة مُرضية وأمنه لإعادة المحول في الخدمة.

○ حسابياً – Mathematically

يُمكن حساب القيمة الدنيا لهذا الفحص بتطبيق المعادلة التالية في حال تم تطبيق الفحص على الثلاثة أطوار معاً الواردة في المرجع [M. Horning, Transformer Maintenance Guide]:

$$R_{20} = \frac{C \cdot E}{\sqrt{kVA}} \quad (2.8)$$

حيث:

R_{20} : أقل قيمة مقاومة لهذا العازل بالأوم عند درجة حرارة (20°) مئوية.

E : الفولتية الاسمية للملفات (فولتية الطور V_{PH}) بالفولت (V).

kVA : قدرة الملفات المفحوصة بالكيلو فولت أمبير (kVA).

C : ثابت يسوي 0.8 للمحولات الزيتية عند درجة حرارة (20°) مئوية، (1.5) مع زيت و (30)

بدون زيت حسب (Low voltage impulse testing of power transformers, Richenbacher,)

(Alan Gregg 1976)

○ الرجوع للمعايير العالمية – International Standards

لم ترد في المعايير الخاصة بهذا الفحص والصادرة عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE) و اللجنة الكهروتقنية الدولية (IEC) أي قِيم دُنيا يُمكن الإعتماد عليها فيما يَخُص الفحص بهذا الأسلوب.

وللحصول على القِيم الدُنيا لمقاومة العازل لمحولات المغمورة بالزيت يُمكن الإعتماد على مراجع أخرى كالدراسة الصادرة عن المجلس الدولي للأنظمة الكهربائية الكبيرة [CIGRE Guide for Transformer Maintenance 445] حيث نجد القِيم المُدرّجة بالجدول (2-6) عند درجة الحرارة (20°) درجة مئوية:

الجدول رقم (2-6)

مقاومة العزل	مستوى فولتية ملف المحول
أكثر من 1000 ميجا أوم	أقل من أو تساوي 69 كيلوفولت
أكثر من 500 ميجا أوم	أكثر من 69 كيلوفولت

أما فيما يَخُص المعايير الصادرة عن المعهد الوطني الأمريكي للمعايير [ANSI/NETA ATS-2009 Table 100.5] يُمكن إيجاد الجدول (2-7) والذي يَضم القِيم الدُنيا لمقاومة العزل للمحولات المغمورة بالزيت:

الجدول رقم (2-7)

أقل قيمة مقاومة عزل	مستوى فولتية ملف المحول
100 ميجا أوم	0 – 600 فولت
1000 ميجا أوم	601 – 5000 فولت
5000 ميجا أوم	أكثر من 5000 فولت

كما وُيُمكن إيجاد الجدول (2-8) والذي يَضم القِيم الدُنيا لمقاومة العزل للمحولات المغمورة بالزيت عند درجة حرارة (20°) مئوية والمُضَمَّن في المرجع [Paul Gill, Electrical Power Equipment Maintenance and Testing].

الجدول رقم (2-8)

أقل قيمة مقاومة عزل	مستوى فولتية ملف المحول
400 ميجا أوم	6.6 كيلو فولت
800 ميجا أوم	6.6 19 كيلو فولت
1000 ميجا أوم	22 45 كيلو فولت
1200 ميجا أوم	أكثر من 66 كيلو فولت

- القراءات المرتبطة بالزمن (مؤشر الإمتصاص والإستقطاب) – Time-Resistance Readings (AI & PI)

يُمكن تحليل نتائج الفحص بهذا الأسلوب بعمل (Trend) ومقارنته بقراءات سابقة لنفس المحول كـ نتائج فحوصات القبول المصنعية (Factory Acceptance Test - FAT) أو الموقعية (Site Acceptance Test - SAT) أو نتائج الفحوصات الروتينية السابقة (Routine Test) إن وُجدت، الجدول (2-9) يضم القيم النموذجية لمؤشر الإستقطاب (PI) للمحولات المغمورة بالزيت حسب المعايير الخاصة بمعهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE, C57.152-2013].

الجدول رقم (2-9)

حالة العزل	مؤشر الإستقطاب Polarization Index - PI
خطير	أقل من 1
ضعيف	1 - 1.1
متوسط (يحتاج لبحث)	1.1 - 1.25
مقبول	1.25 - 2
جيد	أكثر من 2

وكذلك أورد كُتَيْب التعليمات (Manual) الخاص بجهاز فحص العازلية المُصنَّع بواسطة (MEGGER) الجدول (2-10) للقيم النموذجية لقيمة مؤشري الإستقطاب والإمتصاص (AI & PI) بشكل عام.

الجدول رقم (2-10)

حالة العزل	مؤشر الإمتصاص Absorption Index - AI	مؤشر الإستقطاب Polarization Index - PI
خطير	أقل من 1.25	أقل من 1
متوسط (يحتاج لبحث)	1.25 - 1.4	1 - 2
جيد	1.4 - 1.6	2 - 4
ممتاز	أكثر من 1.6	أكثر من 4

- قراءات المقاومة المرتبطة بالفولتية - Step-voltage Readings SV

يُمكن تحليل نتائج الفحص بهذا الأسلوب وذلك برسم العلاقة بين قيمة مقاومة العزل ومستوى الفولتية كما هو مبين بالشكل [(2-6) (ب)]، حيث أن إنخفاض قيمة مقاومة العزل عند الإرتفاع بالفولتية بقدر (25%) بالمئة من شأنه الدلالة على وجود عطل في هذا العازل كتقادم هذا العازل أو وجود شقوق أو فجوات بداخله [M. Horning, Transformer Maintenance Guide].

• قراءات تيار تفريغ العازل - Re-absorption Current or Dielectric Discharge DD

يُمكن تحليل نتائج الفحص بهذا الأسلوب بالرجوع إلى الجدول (2-11) والمُضَمَّن في كُتَيْب التعليمات (Manual) الحاص بجهاز فحص العازلية المُصنع بواسطة شركة (MEGGER).

الجدول رقم (2-11)

حالة العزل	تفريغ العازل – Dielectric Discharge DD
خطير	أكثر من 7
ضعيف	7 - 4
متوسط (يحتاج لبحث)	4 - 2
جيد	أقل من 2
مثالي	0

9.2 عوازل الإختراق / الجُلب – Bushings

نظراً لإختلاف التصميم الخاصة بعوازل إحتراق المحولات (Transformer Bushing) فمنها ما يكون مملوء بالزيت ومنها ما هو هوائي ومنها ما هو جاف وغيرها من التصميم، لذلك لا توجد قِيَم دُنْيَا مُتَّفَق عليها لفحص مقاومة العزل الخاصة بهذا النوع من العوازل، إلا أنه بالرجوع إلى بعض الدراسات والمعايير الصادرة عن [Bureau of Reclamation, Testing and Maintenance of HV Bushings Volume 3-2] سنجد الآتي "إذا تم فحص عازل إختراق (Bushing) بتطبيق فولتية ثابته مقدارها (2500V) وكانت قيمة مقاومة العزل مرتفعة فإن ذلك لا يعني قطعاً أن العازل بحالة ممتازة، و في حال الحصول على قيمة مقاومة عزل أقل من (20GΩ) جيغا أوم فإن هذا العازل بحاجة لبحث لتأكد من سلامته".

9.3 القلب الحديدي – Iron Core

لتحليل نتائج هذا الفحص الخاصة بالقلب الحديدي و بالرجوع إلى المعايير والمراجع العالمية يُمكن إيجاد الآتي:

حسب معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Std C57.152-2013] يُمكن إيجاد الجدول (2-12) فيما يَخُص القِيَم الدُنْيَا لهذا الفحص والخاصة بالقلب الحديدي.

أما فيما يَخُص المعايير الصادرة عن المعهد الوطني الأمريكي للمقاييس [ANSI/NETA ATS-2009] فقد إقترحت مقارنة نتيجة فحص مقاومة العزل الخاصة بالقلب الحديدي مع القيمة القصصية (FAT) بالإضافة إلى التأكد من عدم الحصول على قيمة أقل من (1MΩ) ميغا أوم كنتيجة لهذا الفحص عند تطبيق (500VDC) فولت.

الجدول رقم (2-12)

نوع المحول	قيمة مقاومة العزل للقلب	حالة العزل
محول جديد	أكبر من 500 ميغا أوم	طبيعي (وفي حال كانت القيمة أقل من 500 ميغا أوم يجب التواصل مع مُصنِّع المحول)
محول قديم	أكبر من 100 ميغا أوم	طبيعي
	من 10 إلى 100 ميغا أوم	دلالة على تدهور المادة العازلة
	أقل من 10 ميغا أوم	بحاجة لبحث و تواصل مع المُصنِّع

وحسب الدراسة الصادرة عن المجلس الدولي للأنظمة الكهربائية الكبيرة [CIGRE Guide for Transformer Maintenance 445]، فإنه في حال الحصول على مقاومة عزل أكبر من أو تساوي (10MΩ) ميغا أوم فإنها تعتبر مقبولة، أما إذا كانت مقاومة العزل أقل من (100kΩ) كيلو أوم فإنه يُعتبر مؤشر على فشل نظام العزل الخاص بالقلب الحديدي.

وقد أوردت بعض المراجع مثل كتاب [M. Horning, Transformer Maintenance Guide] طريقة التحليل التالية لفحص مقاومة العزل الخاص بالقلب الحديدي "في حال الحصول على قيمة مقاومة عزل للقلب الحديدي من (1Ω - 2Ω) أوم فإن ذلك مؤشر على وجود تأريض مباشر أو ما يُسمى بالتأريض الصلب (Solid Ground) ويجب إصلاح هذا العطل، أما في حال الحصول على مقاومة عزل للقلب الحديدي قرابة (200Ω - 400Ω) أوم فإن ذلك مؤشر على تأريض للقلب ذو مقاومة مرتفعة غير مرغوب به (High resistance ground) أو ما يُسمى بال(Inadvertent ground) ويمكن إجراء بعض الحلول الموقعية للحد من هذه المشكلة والمذكورة سابقاً في هذا الفصل".

10. العوامل المؤثرة على نتيجة الفحص

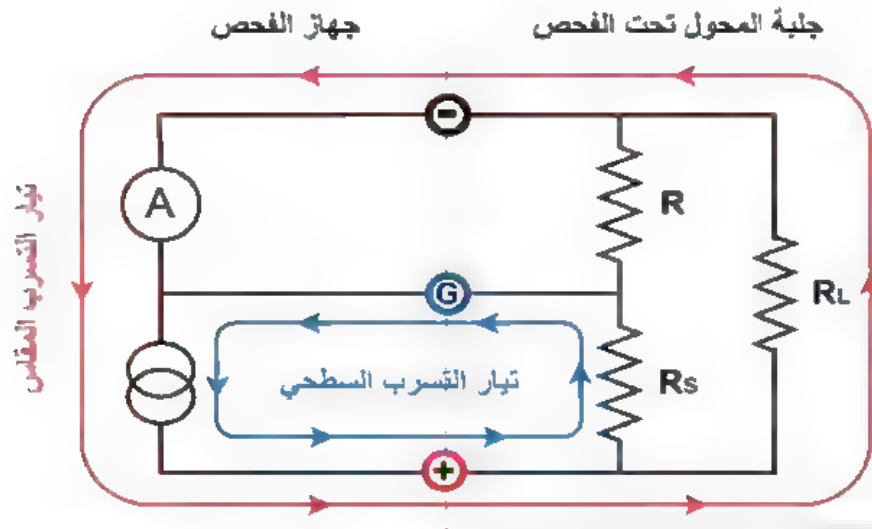
هنالك عدة عوامل مؤثرة على نتيجة هذا الفحص والتي لا بُد من الإحاطة بها من أجل تحييد تأثيرها أو التخفيف منه على الأقل عند إجراء هذا الفحص، ومن هذه العوامل:

10.1 نظافة سطح العازل – Insulation Material Surface Condition

تُعتبر الحالة الخارجية للمادة العازلة أو كما يُمكن تسميتها بالنظافة الخارجية لسطح العازل من أهم العوامل التي تؤثر على قيمة هذا الفحص، حيث أنه بإزدياد نسبة تلوث سطح المادة العازلة تزداد قيمة التيار التسريبي عبر هذا السطح مما يؤثر بشكل مباشر على قيمة مقاومة العازل المُقاسة كما تم شرحه سابقاً. وكما هو معلوم أن هنالك نوعان من المُلوثات أحدهما موصل للتيار الكهربائي بطبيعته كالكربون أو الرماد والآخر غير موصل للتيار الكهربائي بطبيعته كالغبار والملح مثلاً ولكن مع إمتزاجها بالريث أو الماء فإنها تُصبح موصلة للتيار الكهربائي إلى حدٍ ما مما يُسهل تكون تيار التسرب السطحي سابق الذكر

وللتخلص من تأثير هذا العامل يجب تنظيف سطح المادة العازلة قبل الفحص وكذلك استخدام منفذ العزل (Guard) الموجود بجهاز الفحص كما هو مبين في الشكل (2-14) والذي يوضح كيفية قياس مقاومة العزل لعازل إختراق محول (Transformer bushing) مع مراعاة استخدام منفذ العزل (Guard).

ويوضح الشكل (2-17) الدائرة المكافئة لتوصيلة فحص مقاومة العزل لعازل إختراق محول (Transformer Bushing) الطاهرة في الشكل (2-14) مع مراعاة استخدام منفذ العزل (Guard) حيث (R_s) تمثل مقاومة سطح العازل.



الشكل رقم (2-17)

10.2 الرطوبة – Moisture

إن الرطوبة (قطرات الندى) المتشكلة على سطح المادة العازلة من شأنها زيادة تيار التسرب السطحي مما يؤدي إلى انخفاض قيمة مقاومة العزل. لذلك يُفضل عدم إجراء هذا الفحص عند درجات حرارة جوية مُحيطَة دون درجة حرارة تكون قطرات الندى (Dew point temperature).

10.3 درجة حرارة العازل – Insulation Material Temperature

تأثير درجة الحرارة على قيمة المقاومة يختلف للمعادن عنه للمواد غير المعدنية، حيث أن إرتفاع درجة حرارة المواد المعدنية يؤدي إلى ما يُسمى بالتهيج الحراري (Thermal agitation) والذي بدوره يؤدي إلى انخفاض متوسط المسار الحر لحركة الإلكترونات ونتيجة لذلك تنخفض حركة الإلكترونات الحرة مما يزيد من مقاومة المادة المعدنية، أما فيما يخص المواد العازلة الجيدة فإن الإرتفاع في درجة الحرارة يقوم بتزويد المادة بطاقة حرارية (Thermal energy) من شأنها زيادة حقل الشحنة (Charge carriers) مما يقلل من مقاومة المادة العازلة على العكس المادة المعدنية.

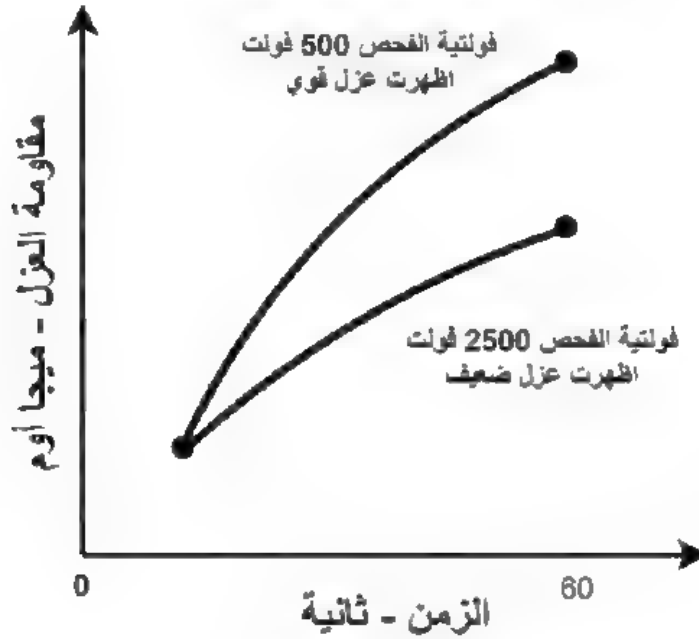
ومن الجدير بالذكر أن درجة حرارة المادة العازلة تؤثر على قيمة مقاومة العزل (IR) أو كما تُسمى بالـ (Spot Test) ولا تؤثر على قيمة مؤشر الإمتصاص والإستقطاب (PI و AI) للسبب المذكور سابقاً.

لذلك لا يُنصح بعمل هذا الفحص في درجة حرارة جو محيط (Ambient temperature) دون درجة حرارة تكون قطرات الندى (Dewpoint temperature)، حيث أنه في حالة وجود شق (Crack) في سطح المادة العازلة وكان هنالك ماء في هذا الشق فإن الماء تحت درجات تكون قطرات الندى يكون قد تحول لحليد، وهذا الحليد تختلف خصائصه تماماً عن الماء وأهمها فقدانه للموصلية الكهربائية إلى حد ما، مما يعني ظهور نتيجة فحص مقاومة عزل جيدة ولا تعكس الحالة الحقيقية للمادة العازلة.

10.4 مقدار فولتية الفحص – Test Voltage Level

يُمكن ملاحظة إختلاف في قيمة مقاومة المادة العازلة نتيجة لإختلاف فولتية الفحص كما هو الحال في أسلوب الفحص (SV)، حيث من المُمكن أن تنخفض قيمة مقاومة العازل نتيجة لزيادة فولتية الفحص كما هو مبين في الشكل (2-18).

في هذه الحالة ومع ارتفاع فولتية الفحص يُمكن قبول الإختلاف البسيط في قيمة هبوط المقاومة، أما إذا كان الإختلاف كبير أي أكبر من (25%) بالمئة فإنه يدل على عزل ضعيف.



الشكل رقم (2-18)

10.5 الشحنات المُخزّنة في الملفات – Stored Charge on Windings

تتأثر قيمة مقاومة العازل نتيجة للشحنات المخزنة في ملفات المحول خاصة بعد فحص مقاومة الملفات (Winding Resistance Measurement - WRM) وهو ما يُسمى بتأثير الذاكرة للعزل (Memory Effect)، لذلك يجب تفريغ الملفات من الشحنات المُتبقية قبل البدء بالفحص وذلك عن طريق تأريض الملفات لمدة رمسية لا تقل عن أربعة أضعاف المدة الزمنية لشحنها (مدة فحص مقاومة الملفات WRM) مثلاً ولمعلومات أكثر حول هذا الموضوع يُمكن قراءة الفقرة الخاصة بتفريغ هذه الشحنات في آخر الفصل.

11. فحوصات إضافية داعمة

تُعتبر المحولات من المعدات ذات الأهمية القصوى في المنظومة الكهربائية لما لها من دور في ديمومة سريان التيار الكهربائي عن طريق ربط عناصر المنظومة جميعها بالإضافة إلى تكلفتها المادية المرتفعة، لذلك لا يُمكن الإعتماد على فشل فحص واحد لتقييم حالة المحول والبدء بعمل الإجراءات التصحيحية لهذا المحول، بل يجب عمل فحوصات أخرى من شأنها تأكيد ما تم الكشف عنه في الفحص الأول وتحديد نوع العطل بالضبط ثم بعد ذلك يُصار لعمل الإجراءات التصحيحية اللازم لهذا المحول والذي قد يتطلب التواصل مع مُصنّع هذا المحول.

11.1 الملفات

عند إجراء هذا الفحص على ملفات المحول وفي حال الحصول على قيمة (**Insulation Resistance - IR**) أو (**Polarization Index - PI**) منخفضة جداً مما يعني وجود عطل أرضي للملفات أو وجود قصر (**short circuit**) بين الملفات أو وجود ما يُسمى بالـ (**Carbon Tracking**)، لا بُد من إجراء بعض الفحوصات الأخرى للتأكد من وجود هذه الأعطال قبل البدء بالإجراءات التصحيحية ومنها فحص الـ (**Polarization and Depolarization Current - PDC**) و فحص الـ (**Frequency Domain Spectroscopy - FDS**) بالإضافة إلى فحص معامل التبدد أو القدرة (**Dissipation/Power Factor - Df/PF**) و فحص الفولتية المُستحثة (**Induced Voltage Test**)، كما ويُنصح أيضاً بقياس مستوى الرطوبة في زيت العزل للمحول (**Water content or Moisture**).

11.2 عوازل الإختراق

بالنسبة لعوازل الإختراق (**Transformer Bushings**) لا يُعد فحص مقاومة العازل من الفحوصات التي من شأنها الكشف عن الأعطال بشكل مُبكر، مما يعني أن فشل هذا الفحص مؤشر على وجود عطل في مرحلته المتقدمة ويحتاج لبحث وإجراءات تصحيحية فورية، لذلك فيما يخص عوازل الإختراق (**Bushings**) هنالك الكثير من الفحوصات التي من شأنها الكشف عن حالتها بشكل أكثر دقة كفحص معامل التبدد أو القدرة عند التردد الإسمي (**Dissipation/Power Factor @ line Frequency - DF/PF**) وفحص المُواسعة (**Capacitance - C**) وفحص (**Dissipation/Power Factor tip-up**) وفحص (**Variable Frequency Dissipation/Power Factor**) وفحص (**Dielectric Frequency Response - DFR**) وفحص التفريغ الجُزئي (**Partial Discharge - PD**)، كما ويُنصح أيضاً بإجراء فحص الغازات الذائبة في زيت عازل الإختراق (**Dissolved Gases Analysis - DGA**).

11.3 القلب الحديدي

عند إجراء هذا الفحص على القلب الحديدي وفي حال الحصول على قيمة (**Insulation Resistance - IR**) مُنخفضة جداً مما يعني وجود عطل أرضي لهذا القلب الحديدي أو كما ذُكر سابقاً هنالك نقطة تأريض أخرى، لذلك لا بُد من إجراء بعض الفحوصات الأخرى للتأكد من وجود هذه الأعطال قبل البدء بالإجراءات التصحيحية ومنها فحص معامل التبدد أو القدرة (**Dissipation/Power Factor -**)

12. تفريغ الملفات وإزالة تَمَغْنُط القلب الحديدي

عادةً بعد فحص مقاومة العزل (Insulation Resistance - IR) و فحص مقاومة ملفات (Winding Resistance Measurement - WRM) أي عموماً بعد الفحوصات التي يتم من خلالها تطبيق فولتية ثابتة (DC Voltage) والتي بدورها تقوم بشحن ملفات المحول (Winding Trapped Charge) وكذلك تؤدي إلى تَمَغْنُط القلب الحديدي للمحول أو ما يُسمى بالـ (Core Magnetization)، فإنه من الضروري تفريغ شحنة الملفات (Winding Discharge) وكذلك إزالة تَمَغْنُط القلب الحديدي (Core De-magnetization) بعد الإنتهاء من الفحص وقبل كهربية المحول (Transformer energization) أو إجراء فحوصات أخرى وذلك تجنباً لحدوث الظواهر التالية:

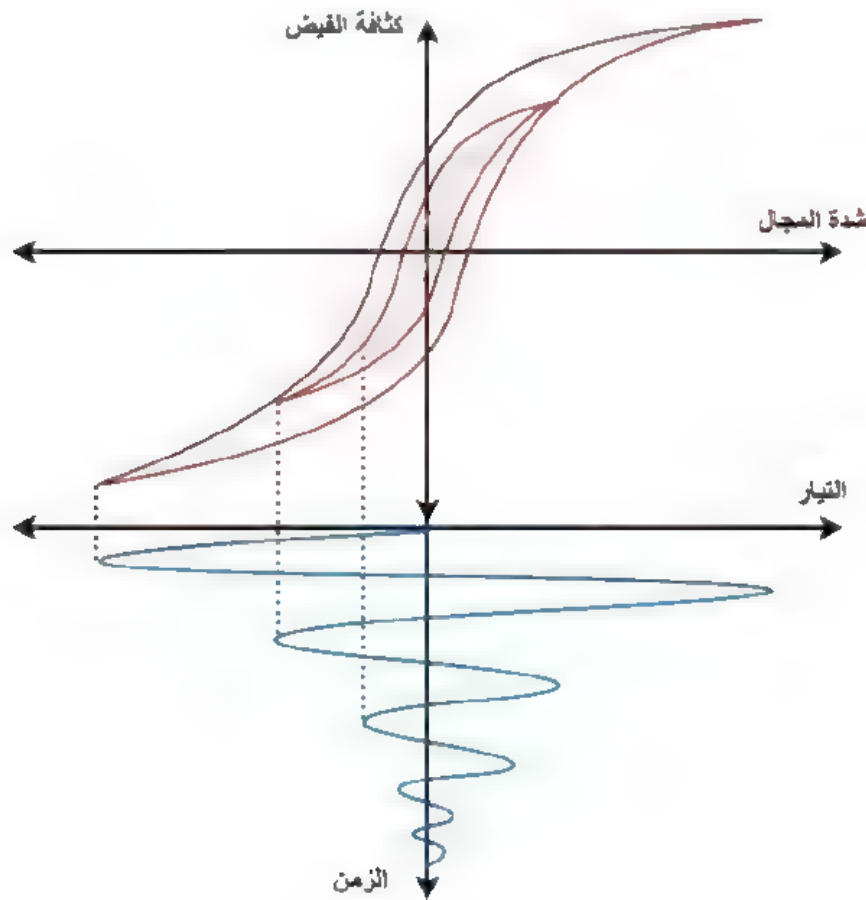
- حدوث صدمة حثية (Induction Kickback) ناتجة عن الطاقة المحزنة في محاثّة ملفات المحول $(E = \frac{1}{2} I^2 L)$ والتي قد تنطوي على مخاطر من شأنها التأثير على الأشخاص و المعدات.
- ظهور تيارات عالية غير إعتيادية (High Inrush Current) عند كهربية المحول (Transformer Energization)
- ظهور نتائج غير دقيقة عند تطبيق الفحوصات التالية:
 - الإستجابة الترددية للخسائر الشاردة - Frequency Response of stray losses FRSL
 - نسبة لفات المحول - Transformer Turns Ratio TTR
 - مُفاعلة التسرّب - Transformer Leakage Reactance
 - تيار التهيج Transformer Excitation Current
 - تحليل الإستجابة الترددية المَسْحي Sweep Frequency Response Analysis

لذلك يجب تفريغ الطاقة المحزنة في الملفات (Winding Discharge) وذلك عن طريق قَصْر (Short circuit) أطراف ملفات المحول ووصلها بالأرض لفترة رسمية مناسبة وتُقَدَّر بأربعة أضعاف زمن تطبيق الفولتية الثابتة على الملفات أثناء الفحص أو قُرابة الـ 30 ثانية كما هو مذكور في بعض المراجع والمعايير، وعادةً أجهزة الفحص الحديثة والمُصنّعة بواسطة شركة (MEGGER, OMICRON & METREL) تقوم بالتفريغ تلقائياً بعد الإنتهاء من إجراء الفحص.

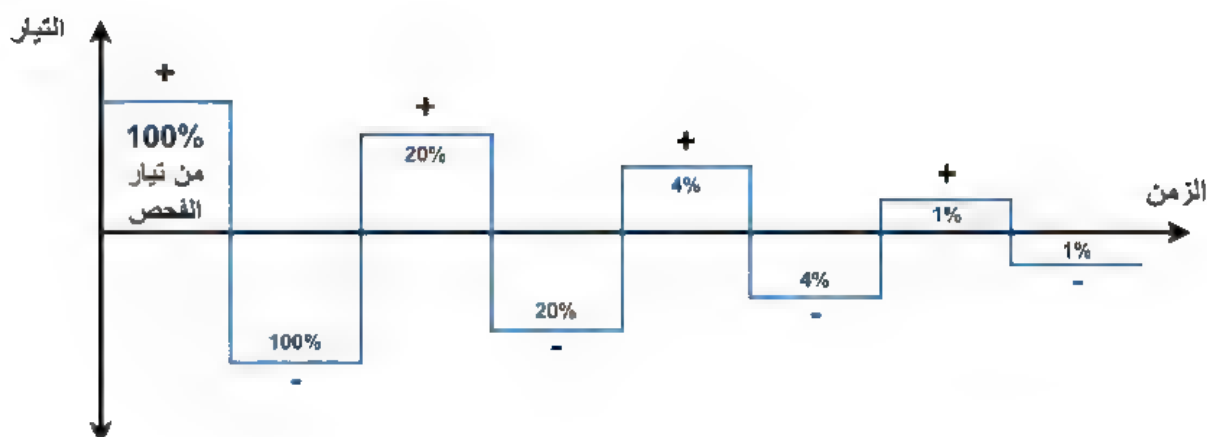
أما فيما يخص إزالة تَمَغْنُط القلب الحديدي للمحول (Core De-magnetization) فإنه يتم بعدة طرق وهي:

- طريقة التسخين: في هذه الطريقة يتم تسخين المادة المُراد إزالة تمغنطها لدرجة حرارة فوق درجة حرارة كيوري (Curie Temperature)، وهي درجة الحرارة التي تفقد عندها المادة خصائصها المغناطيسية فمثلاً للحديد المُكوّن للقلب الحديدي تساوي (770°) درجة مئوية ولكن هذه الطريقة لا يُمكن إستخدامها في المحولات نظراً لخطورتها على المادة العازلة.

- **طريقة حقن تيار متناقص:** في هذه الطريقة يتم حقن تيار متناقص في الملفات حتى الوصول إلى حالة عدم المعنطة ويتم ذلك بطريقتين وهما طريقة التيار المتردد (AC) كما هو موضح في الشكل (2-19) وهي طريقة قد تنطوي على بعض المخاطر فيما يخص السلامة العامة نظراً لإرتفاع قيمة الفولتية المتناقصة، وعادة ما يتم إجراء هذه الطريقة في المختبرات المُجهزة لذلك ونادراً ما يتم عمل هذه الطريقة في الموقع، لذلك يتم اللجوء لطريقة التيار الثابت (DC) متردد القطبية (Alternating polarities) والمتناقص مع الزمن إلى حين التخلص من تَمَعُطُ القلب الحديدي للمحول كما هو موضح بالشكل (2-20) وذلك حسب معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Std C57.152-2013] حيث أن هذه الطريقة لا تحتاج لفولتية مرتفعة كنظيرتها للتيار المتردد سابق الذكر، وعادةً أجهزة الفحص الحديثة مثل (TESTRANO by OMICRON) تقوم بإزالة تَمَعُطُ القلب الحديدي (De-magnetization) تلقائياً أو يدوياً بعد الإنتهاء من إجراء الفحوصات التي تعتمد تطبيق فولتية ثابتة على ملفات المحول كفحص مقاومة الملفات (WRM) كما هو مُبين بالملحق (3-5) في نهاية فصل فحص مقاومة الملفات (WRM) التالي.



الشكل رقم (2-19)



الشكل رقم (2-20)

13. أمثلة على نتائج فحوصات مصنعية

13.1 المثال الأول: الشكل (2-21) يُبين قيم فحص مقاومة عزل (Insulation Resistance) مصنعي (FAT) لمحول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (Three Phase Two Winding) موصول بطريقة (YNd11) ذو مُغَيِّر خطوة من نوع (DETC أو OCTC).

Acceptance Test Certificates							
Customer	INSULATION RESISTANCE MEASUREMENT		Page No.				
	Standard EC 60076-1		Serial No.				
	Report No.						
Rated Power V/A 100/140	Rated Voltage (kV) 400/5	Vendor Group					
Weather	Indoor - Closed Place						
Ambient temperature	22.0 °C						
Relative humidity	40.0 %						
Object temperature	29.1 °C						
MEASUREMENTS	TEST VOLTAGE (kV)	at 15 th seconds (MΩ)	at 30 th seconds (MΩ)	at 45 th seconds (MΩ)	at 60 th seconds (MΩ)	at 600 th seconds (MΩ)	P1 at 600/N100
HV TANK - LV(Guarded)	5	45100	51200	55300	56500	75100	1.33
HV - LV TANK(Guarded)	5	70300	120000	140000	147000	294000	2.00
LV TANK - HV(Guarded)	5	25000	30100	45200	49000	151900	3.10
CORE TANK	-	7000	10000	12100	16200		NA

الشكل رقم (2-21)

13.2 المثال الثاني: الشكل (2-22) يُبين قِيم فحص مقاومة عزل (Insulation Resistance) لمصنعي (FAT) لمحول ثلاثي الأطوار ثلاثي الملفات (Three Phase Tertiary Winding)

Measurement of d.c. insulation resistance between each winding to earth and between windings					
Relative humidity :33%		Atmospheric pressure 0.095MPa		Oil temperature 23.1C	
Measured sequence and data					
tested winding	Earthing parts	Insulation resistance values MΩ		Absorption ratio	Test voltage (V)
		R _{1-x}	R ₁₋₀		
HV	Other winding, core, frame and tank enclosure	1500	2620	1.75	5000
LV1		1840	4050	2.20	5000
LV2		2100	3500	1.67	5000
HV + LV1+LV2		2050	3450	1.68	5000
Measured sequence and data between winding					
tested winding	Earthing parts	Insulation resistance values MΩ		Absorption ratio	Test voltage V
		R ₁₋₂	R ₁₋₀		
HV to LV1	Core, frame and tank enclosure	1900	4180	2.20	5000
HV to LV2		2700	5670	2.10	5000
LV1 to LV2		4100	7380	1.80	5000
Test results		Measured values meet the relevant requirements			
core and frame insulation for liquid immersed transformers					
tested winding	Earthing parts	Insulation resistance values of R ₁₋₀ (MΩ)		Test voltage (V)	
Core	Winding frame and tank enclosure	>1000		2500	
Frame	Winding core and tank enclosure	>1000		2500	
Test results		Measured values meet the relevant requirements			

الشكل رقم (2-22)

الملحق (2-1)

تنويه

يضم هذا الملحق خطوات الفحص وتوصيلاته بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسّط. إستناداً على الخبرة بالتعامل مع هذه الأجهزة، وتُجدر الإشارة أنه في حال إستخدام جهاز الفحص المُشار إليه في هذا الملحق لا يجب الإعتماد على هذا الملحق فقط، بل يجب قراءة الكُتبيات التفصيلية الخاصة بهذا الجهاز والمزودة بواسطة الشركة المُصنعة للجهاز جيداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية و السلامة العامة

فحص مقاومة العزل بإستخدام جهاز

Insulation Tester MIT 1025 10kV by MEGGER



الشكل، رقم (2-1-1)

• مواصفات الجهاز: حسب (MIT 1025 manual)

- فولتية المدخل الإسمية : 90-264 V rms, 47-63 Hz, 100VA
- نطاق فولتية المخرج : 500, 1000, 2500, 5000, 10000 VDC
- دقة فولتية الفحص : +4%, -0%, ±10% V nominal test voltage @ 1GΩ load
- نطاق المقاومات المُقاسة : (10 kΩ – 15 TΩ @ 5kV), (10 kΩ – 20 TΩ @ 10kV)
- أساليب الفحص : IR, IR(t), DAR, PI, SV, DD, Ramp test
- دقة القياسات من 1MΩ إلى : (±5% ≤ 2TΩ), (±20% to 20TΩ)

- درجة الحماية IP : IP65 (Lid closed), IP40 (Lid open)
- وزن الجهاز : 10 lb. (4.5 kg)
- البيئة التشغيلية المحيطة : -4° F to 122° F (-20° C to 50° C) RH to 90%, Non condensing
- البيئة التخزينية المحيطة : -13° F to 149° F (-25° C to 65° C) RH to 95%, Non condensing

● خطوات الفحص بواسطة هذا الجهاز:

1. التأكد من تطبيق الخطوات (7.1 إلى 7.8) الواردة في فقرة خطوات الفحص من فصل فحص مقاومة العزل (IR).
2. التأكد من أن الدائرة المُراد فحصها غير مُكهربة و عدم وجود احتمالية لكهربتها أثناء الفحص.
3. لا تَقُم بلمس دائرة الفحص أثناء إجراء الفحص أو بعده إلا بعد التأكد من عدم وجود فولتية وأن الملفات تم تفريغها من الشحنات تماماً.
4. التأكد من أن أسلاك التوصيل الخاصة بجهاز الفحص (Test leads) وكذلك الـ (Crocodile Clips) في حالة جيدة وغير متسخة ولا تعاني من أية أضرار فيزيائية كالشقوق أو الكسور للعزل الخاص بها.
5. التأكد من أن جهاز الفحص المُراد إستخدامه مُعاير (Calibrated).
6. قبل البدء بالفحص يُفضل التعرف على أجزاء الواحدة الرئيسية للجهاز من شاشة ومنافذ وأزرار ومفاتيح تحكم ولمبات إشارة كما هو مبين بالشكل (2-1-2).



الشكل رقم (2-1-2)

7. إحضار جهاز الفحص إلى الموقع وتوصيل الأسلاك الخاصة به على النحو التالي:

7.1 التأكد من أن المفتاح المركزي لجهاز الفحص على وضعية (OFF)

7.2 توصيل جهاز الفحص بالمصدر الكهربائي (Power cable)

7.3 توصيل السلك الأحمر بالمكان المخصص له على الجهاز (+L) منفذ الفحص الموجب.

7.4 توصيل السلك الأزرق بالمكان المخصص له على الجهاز (Guard - G) منفذ الفحص الأزرق.

7.5 توصيل السلك الأسود بالمكان المخصص له على الجهاز (-E) منفذ الفحص السالب.

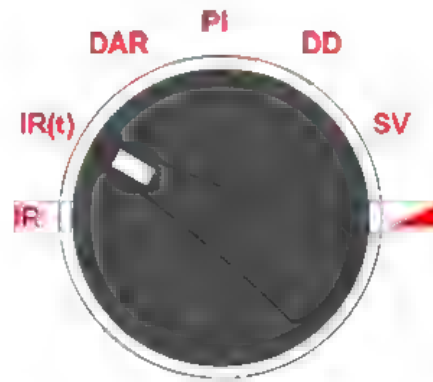
8. توصيل أسلاك جهاز الفحص (Test Leads) بأطراف المحول وذلك بالرجوع إلى الجداول (2-2) و

(2-3) وكذلك الأشكال (2-9) إلى (2-16) من فصل فحص مقاومة العزل وذلك بعد إختيار

التوصيلة المناسبة.

9. إختيار أسلوب الفحص المناسب وذلك من خلال تغير وضعية المفتاح الموضح في الشكل (2-1-3)

(3)



الشكل رقم (2-1-3)

حيث يُمكننا هذا الجهاز من القيام بالفحص وفقاً للأساليب التالية:

9.1 الأسلوب الأول (IR(t)) قراءات الزمن القصير (Spot Test)؛ بعد إختيار هذا الأسلوب تظهر على

الشاشة مدة الفحص وعادة ما تكون دقيقة واحدة ويُمكن تغييرها عبر السهم العلوي والسفلي ثم

الضغط على زر الموافقة (OK).

9.2 الأسلوب الثاني (Dielectric Absorption Ratio DAR or AI)؛ بعد إختيار هذا الأسلوب وهو

ناتج قسمة (t2/t1) يظهر على الشاشة الزمن (t1) ثم (t2) وعادة ما يجب ضبط قيمة (t1) لهذا

الأسلوب (30 sec) ثانية و الزمن (t2) على (1 min) دقيقة و من ثم الضغط على زر موافقة

(OK).

9.3 الأسلوب الثالث (Polarization Index PI)؛ بعد إختيار هذا الأسلوب وهو ناتج قسمة ($t2/t1$) يظهر على الشاشة الرمن ($t1$) ثم ($t2$) وعادة ما يجب ضبط قيمة ($t1$) لهذا الأسلوب (1 min) دقيقة والرمن ($t2$) على (10 min) دقائق و من ثم الضغط على زر موافقة (OK).

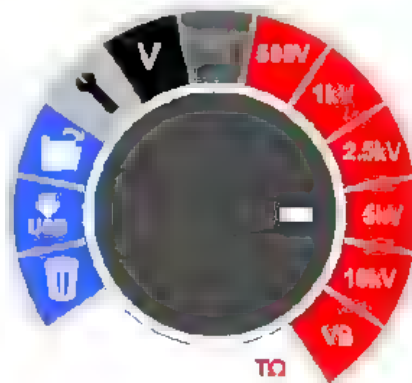
9.4 الأسلوب الرابع (Dielectric Discharge DD)؛ بعد إختيار هذا الأسلوب والذي يعتمد على قياس التيار في الدقيقة الأولى بعد تطبيق الفولتية الثابتة على المادة العازلة بزمن مقداره ($t1$) و الذي عادة ما يتم ضبطه ليكون (30 min) دقيقة ومن ثم الضغط على زر الموافقة (OK).

9.5 الأسلوب الخامس (Step Voltage SV)؛ في هذا الفحص يقوم جهاز الفحص بتطبيق الفولتية بالتدرج وعادة ما يكون زمن هذا الفحص (5 min) دقائق ويمكن تغييرها.

مثال: إذا أردنا عمل هذا الفحص وقمنا بضبط الزمن على (5 min) دقائق والفولتية الفحص على (5 kV) كيلو فولت فإن جهاز الفحص سيقوم بحقن (1 kV) كيلو فولت لمدة دقيقة ثم يرفع الفولتية إلى (2 kV) كيلو فولت لمدة دقيقة وهكذا إلى أن يصل إلى (5 kV) كيلو فولت بعد (5 min) دقائق.

9.6 الأسلوب السادس (Ramp Voltage)؛ في هذا الفحص يقوم جهاز الفحص بحقن الفولتية بالتدرج على شكل (Ramp) وليس على شكل درجات كما هو الحال بالأسلوب السابق.

10. إختيار فولتية الفحص المناسبة وذلك من خلال تعير وصعية المفتاح المركزي المبين في الشكل (2-1-4).



الشكل رقم (2-1-4)

11. بدء الفحص (تطبيق الفولتية) وذلك بالضغط مطولاً على زر بدء الفحص (Test) الظاهرة في الشكل (2-1-5) لحين بدء الجهاز بحقن الفولتية، حيث تبدأ لمة الإشارة الحمراء المبينة في الشكل (2-1-2) بالوميض المتقطع (Blinking) طيلة مدة تطبيق الفولتية على المحول.



الشكل رقم (2-1-5)

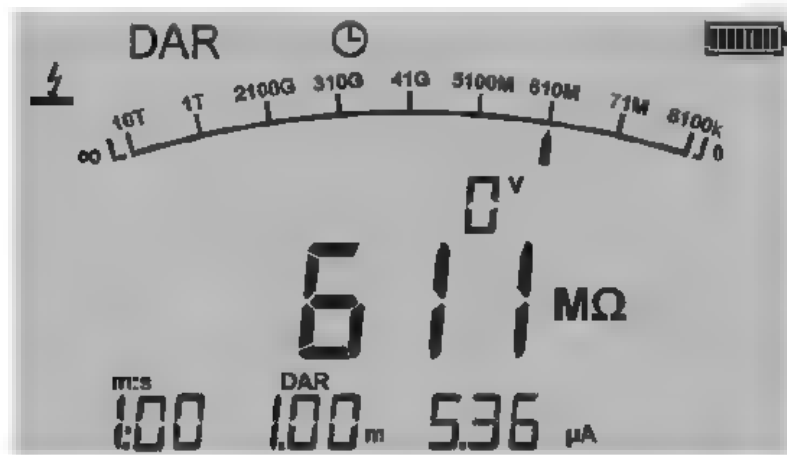
12. بعد إنتهاء مدة الفحص تظهر النتيجة على الشاشة ويقوم جهاز الفحص تلقائياً بعمل تفريغ للطاقة المخزنة في الملفات.

الشكل (2-1-6) يُبين شاشة النتائج بعد إنتهاء الفحص بإستخدام أسلوب الفحص (IR) أو الـ (Spot Test).



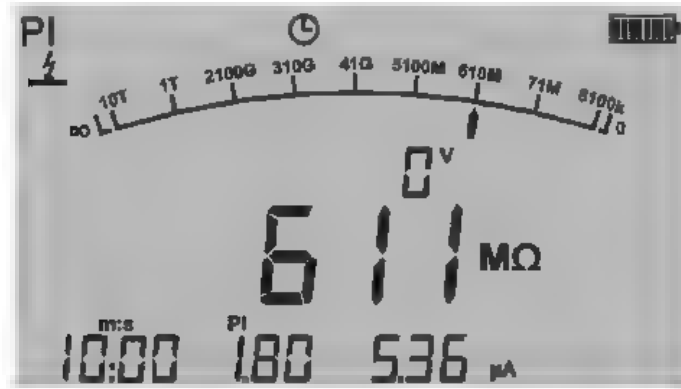
الشكل رقم (2-1-6)

الشكل (2-1-7) يُبين شاشة النتائج بعد إنتهاء الفحص بإستخدام أسلوب الفحص (DAR).



الشكل رقم (2-1-7)

الشكل (2-1-8) يُبين شاشة النتائج بعد إنتهاء الفحص باستخدام أسلوب الفحص (PI).



الشكل رقم (2-1-8)

الشكل (2-1-9) يُبين شاشة النتائج بعد إنتهاء الفحص باستخدام أسلوب الفحص (DD).



الشكل رقم (2-1-9)

الشكل (2-1-10) يُبين شاشة النتائج بعد إنتهاء الفحص باستخدام أسلوب الفحص (SV).



الشكل رقم (2-1-10)

تحذير: وفي حال أردت إيقاف الفحص (حقن الفولتية) قبل إنتهاء وقت الفحص لأي سبب من الأسباب نقوم بالضغط على زر فحص (TEST).



الملحق (2-2)

تنويه

يضم هذا الملحق خطوات الفحص وتوصيلاته بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسّط. إستناداً على الخبرة بالتعامل مع هذه الأجهزة، وتُجدر الإشارة أنه في حال إستخدام جهاز الفحص المُشار إليه في هذا الملحق لا يجب الإعتماد على هذا الملحق فقط، بل يجب قراءة الكُتيبات التفصيلية الخاصة بهذا الجهاز والمزودة بواسطة الشركة المُصنعة للجهاز جيداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية و السلامة العامة

فحص مقاومة العزل بإستخدام جهاز

TeraOhmXA MI 3210 10kV by METREL



الشكل رقم (2-2-1)

• خطوات الفحص بواسطة هذا الجهاز:

1. التأكد من تطبيق الخطوات (7.1 إلى 7.8) الواردة في فقرة خطوات الفحص من فصل فحص مقاومة العزل.
2. التأكد من أن الدائرة المُراد فحصها غير مُكهربة و عدم وجود إحتتمالية لكهربتها أثناء الفحص
3. لا تُقَم بلمس دائرة الفحص أثناء إجراء الفحص أو بعده إلا بعد التأكد من عدم وجود فولتية وأن الملفات تم تفريغها من الشحنات تماماً.

4. التأكد من أن أسلاك التوصيل الخاصة بجهاز الفحص (Test leads) وكذلك الـ (Crocodile Clips) في حالة جيدة وغير متسخة ولا تُعاني من أية أضرار فيزيائية كالشقوق أو الكسور للعرل الخاص بها.

5. التأكد من أن جهاز الفحص المُراد استخدامه مُعاير (Calibrated).

6. قبل البدء بالفحص يُفصل التعرّف على أجزاء الواحدة الرئيسية للجهاز من شاشة ومنافذ وأزرار ومفاتيح تحكم ولمبات إشارة كما هو مُبين بالشكل (2-2-2).



الشكل رقم (2-2-2)

7. إحضار جهاز الفحص إلى الموقع و توصيل الأسلاك الخاصة به على النحو التالي:

7.1 توصيل جهاز الفحص بالمصدر الكهربائي (Power cable).

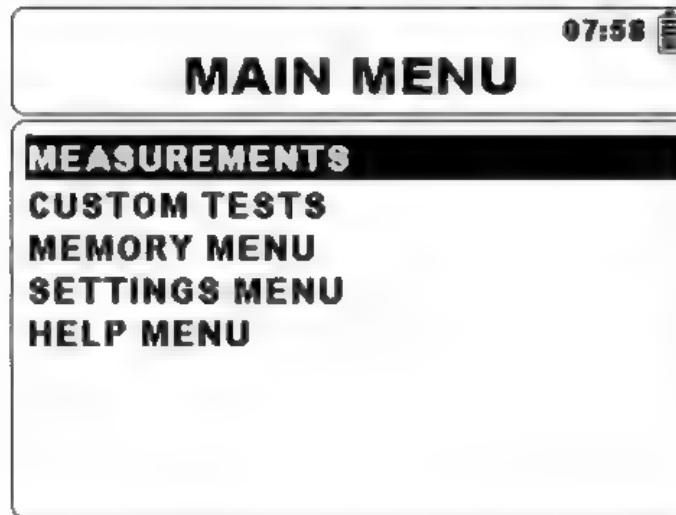
7.2 توصيل السلك الأصفر والمُشار إليه بمقدمة حمراء اللون بالمكان المخصص له على الجهاز (+Rx) منفذ الفحص الموجب.

7.3 توصيل السلك الأخضر بالمكان المخصص له على الجهاز (Guard - G) منفذ الفحص الأخضر.

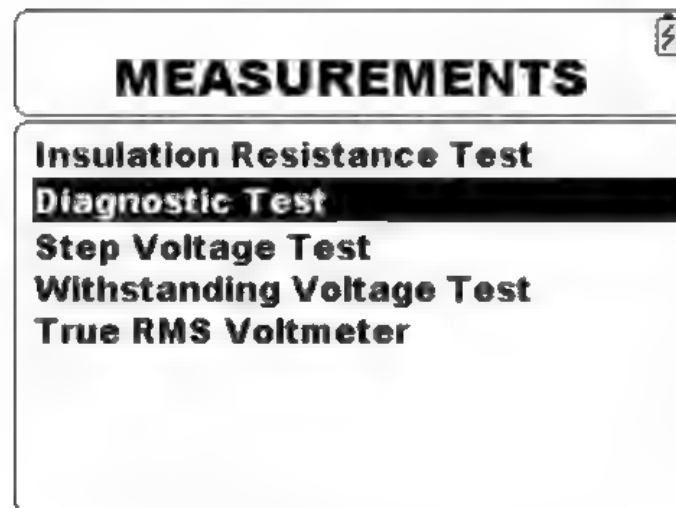
7.4 توصيل السلك الأصفر والمُشار إليه بمقدمة سوداء اللون بالمكان المخصص له على الجهاز (-Rx) منفذ الفحص السالب.

8. توصيل أسلاك جهاز الفحص (Test Leads) بأطراف المحول وذلك بالرجوع إلى الجدول (2-2) و (2-3) وكذلك الأشكال (2-9) إلى (2-16) من فصل فحص مقاومة العزل وذلك بعد إختيار التوصيلة المناسبة.

9. تشغيل الجهاز لتظهر القائمة الرئيسية المبينة في الشكل (2-2-3) ونختار قياسات (Measurements) وذلك بتحديد ما عبر الأسهم ثم الضغط على زر إختيار (Select) للانتقال لنافذة القياسات (Measurements) والمبينة في الشكل (2-2-4).

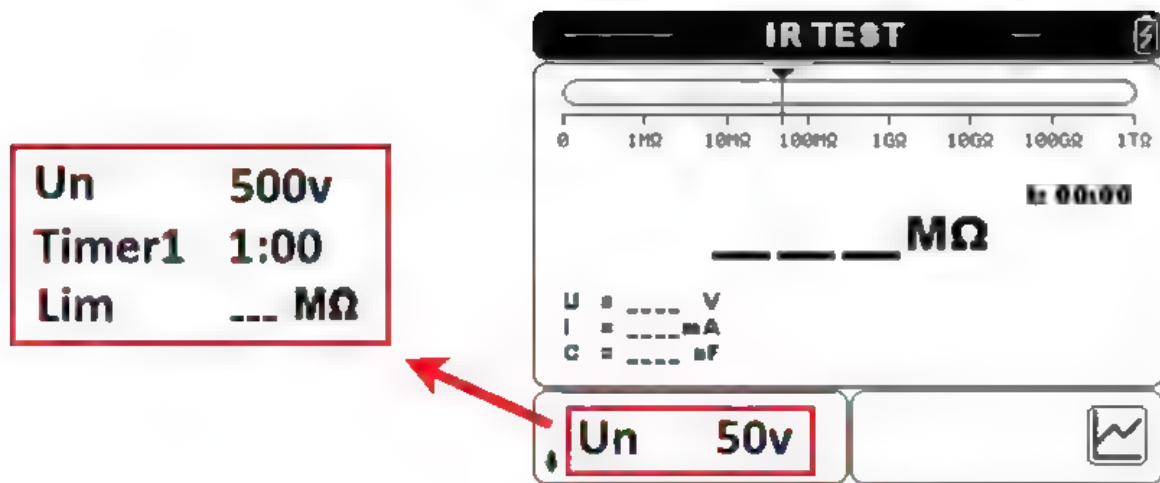


الشكل رقم (2-2-3)



الشكل رقم (2-2-4)

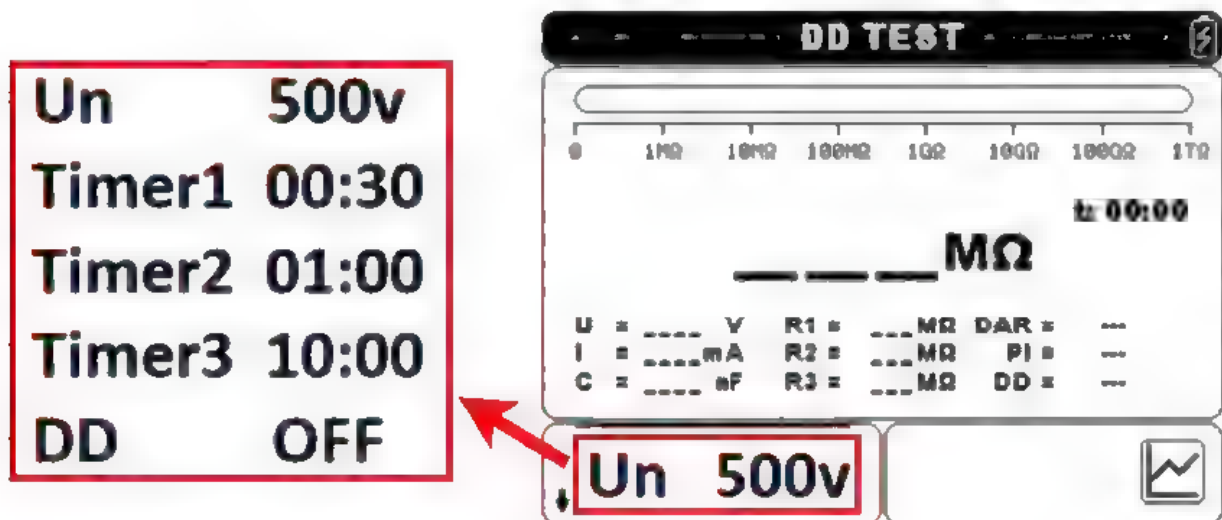
10. نقوم بإختيار واحدة من أساليب الفحص التالية:
10.1 الفحص بأسلوب الزمن القصير (Spot Test)؛ نقوم بإختيار (Insulation Resistance Test) من نافذة القياسات (Measurements) المبينة في الشكل (2-2-4) بالضغط على زر (Select) للانتقال للنافذة الخاصة بهذا الأسلوب و المبينة في الشكل (2-2-5).



الشكل رقم (2-2-5)

من الشكل (2-2-5) يستخدم الأسهم الأربعة يتم تحديد فولتية الفحص (Un) و مدة الفحص (Timer1) وكذلك حد أعلى لقيمة الفحص (Lim) إذا أردت، و عادة ما تكون مدة الفحص دقيقة واحدة لهذا الأسلوب.

10.2 الفحص بأسلوب مؤشر الإمتصاص (DAR) و مؤشر الإستقطاب (PI) و أسلوب تفريغ العازل (DD)؛ نقوم بإختيار (Diagnostic Test) من نافذة القياسات (Measurements) المبينة في الشكل (2-2-4) بالضغط على زر (Select) لننتقل للنافذة الخاصة بهذا الأسلوب و المبينة في الشكل (2-2-6).



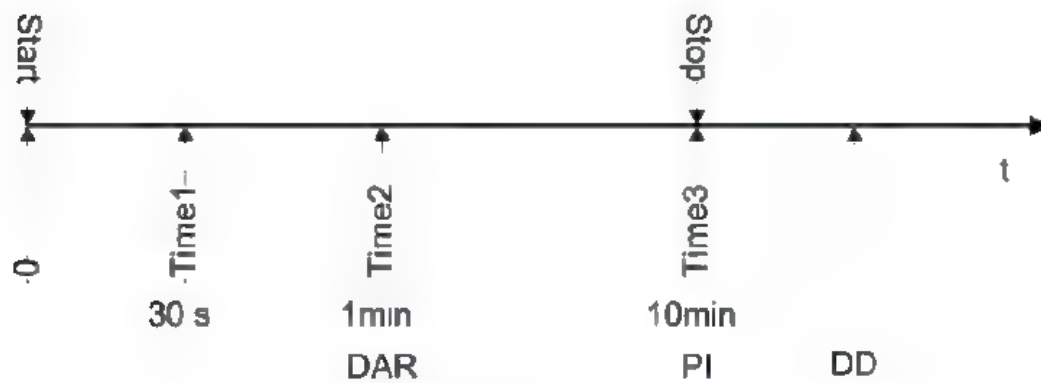
الشكل رقم (2-2-6)

إذا أردنا إجراء الفحص بأسلوب مؤشر الإمتصاص (DAR or AI) يستخدم الأسهم نقوم بتحديد فولتية الفحص (Un) و الزمن (Timer1) و الزمن (Timer2)، و عادة ما يكون الزمن الأول

(Timer1) مقداره (30 s) و الزمن الثاني (Timer2) مقداره (1 min)، حيث في هذا الأسلوب تكون النتيجة حاصل قسمة (Timer2) على (Timer1).

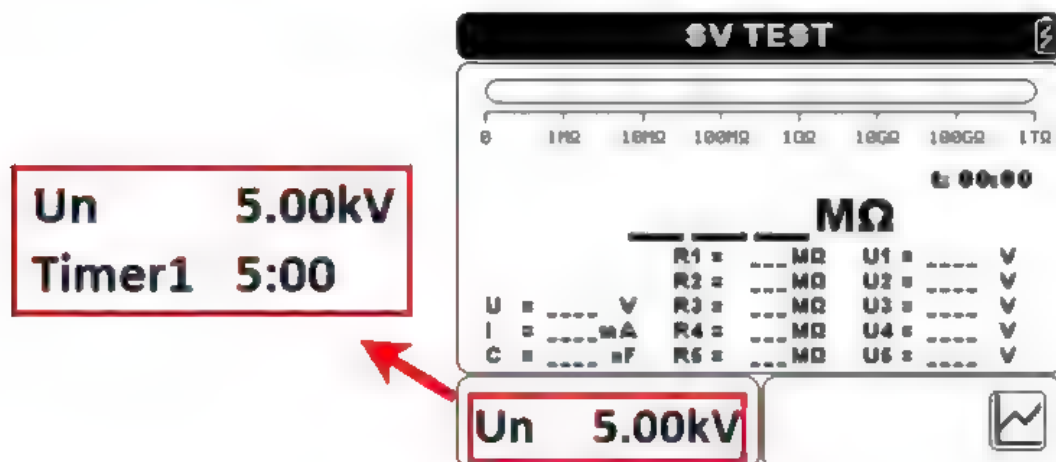
و إذا أردنا إجراء الفحص بأسلوب مؤشر الإستقطاب (PI) بإستخدام الأسهم نقوم بتحديد فولتية الفحص (Uh) و الزمن (Timer2) و الزمن (Timer3)، و عادة ما يكون الزمن الأول (Timer2) مقداره (1 min) و الزمن الثالث (Timer3) مقداره (10 min)، حيث في هذا الأسلوب تكون النتيجة حاصل قسمة (Timer3) على (Timer2).

أما إذا أردنا إجراء الفحص بأسلوب تيار التفريغ (DD) بإستخدام الأسهم نقوم بتحديد فولتية الفحص (Uh) و الزمن (Timer2) و الزمن (Timer3) و تفعيل هذا الأسلوب بجعل (DD) (ON)، و عادة ما يكون الزمن الثاني (Timer2) مقداره (1 min) و الزمن الثالث (Timer3) مقداره (30 min) أو إبقاؤه (10 min).



الشكل رقم (2-2-7)

10.3 الفحص بأسلوب التدرج في الفولتية (SV)؛ نقوم بإختيار (Step Voltage Test) من نافذة القياسات (Measurements) المبينة في الشكل (2-2-4) بالضغط على زر (Select) للإنتقال للنافذة الخاصة بهذا الأسلوب و المبينة في الشكل (2-2-8).



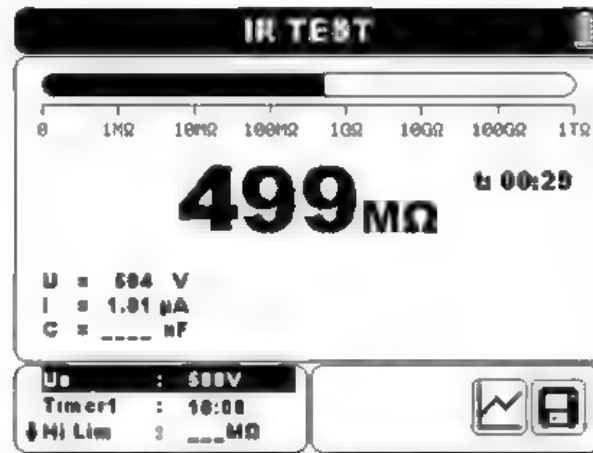
الشكل رقم (2-2-8)

مثال: إذا أردنا عمل هذا الفحص وقمنا بضبط الرمن على (5 min) دقائق والفولتية الفحص على (5 kV) كيلو فولت فإن جهاز الفحص سيقوم بحقن (1 kV) كيلو فولت لمدة دقيقة ثم يرفع الفولتية إلى (2 kV) كيلو فولت لمدة دقيقة وهكذا إلى أن يصل إلى (5 kV) كيلو فولت بعد (5 min) دقائق.

11. بدء الفحص (تطبيق الفولتية) وذلك بالضغط على زر (Start/Stop) المبين في الشكل (2-2-2) حيث تبدأ لمبة الإشارة الحمراء بالوميض المتقطع (Blinking) طيلة مدة تطبيق الفولتية.
12. بعد إنتهاء مدة الفحص تظهر النتيجة على الشاشة ويقوم جهاز الفحص تلقائياً بعمل تفريغ للطاقة المخزنة في الملفات.

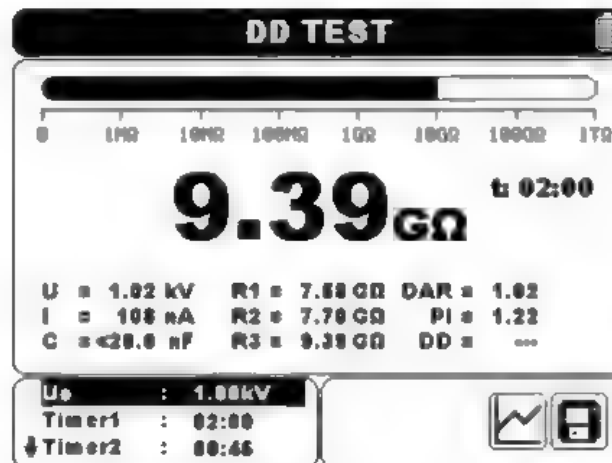
مثال: في حال إجراء الفحص بأسلوب الرمن القصير (IR Spot Test) يُمكن إيقاف الفحص بعد إستقرار قيمة مقاومة العزل بالضغط على زر (Start/Stop) أو بالإنظار حتى إنتهاء مدة الفحص.

الشكل (2-2-9) يوضح شاشة النتائج للجهاز بعد إنتهاء الفحص بإستخدام أسلوب الفحص (IR)



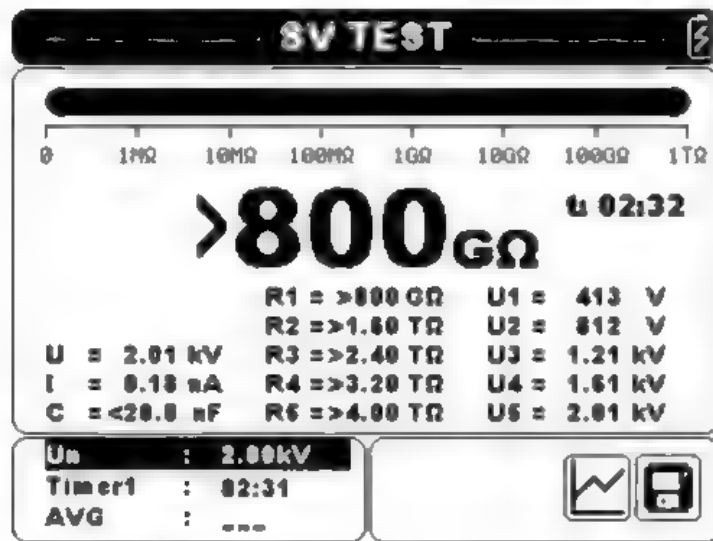
الشكل رقم (2-2-9)

الشكل (2-2-10) يوضح شاشة النتائج للجهاز بعد إنتهاء الفحص بإستخدام أسلوب الفحص (DAR & PI & DD).



الشكل رقم (2-2-10)

الشكل (2-2-11) يوضح شاشة النتائج للجهاز بعد إنتهاء الفحص باستخدام أسلوب الفحص (SV).



الشكل رقم (2-2-11)

الملحق (2-3)

تنويه

يضم هذا الملحق خطوات الفحص وتوصيلاته بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسّط. إستناداً على الخبرة بالتعامل مع هذه الأجهزة، وتُجدر الإشارة أنه في حال إستخدام جهاز الفحص المُشار إليه في هذا الملحق لا يجب الإعتماد على هذا الملحق فقط، بل يجب قراءة الكُتيبات التفصيلية الخاصة بهذا الجهاز والمزودة بواسطة الشركة المُصنعة للجهاز جيداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية و السلامة العامة

فحص مقاومة العزل بإستخدام جهاز

1555 10kV Insulation Resistance Tester by FLUKE

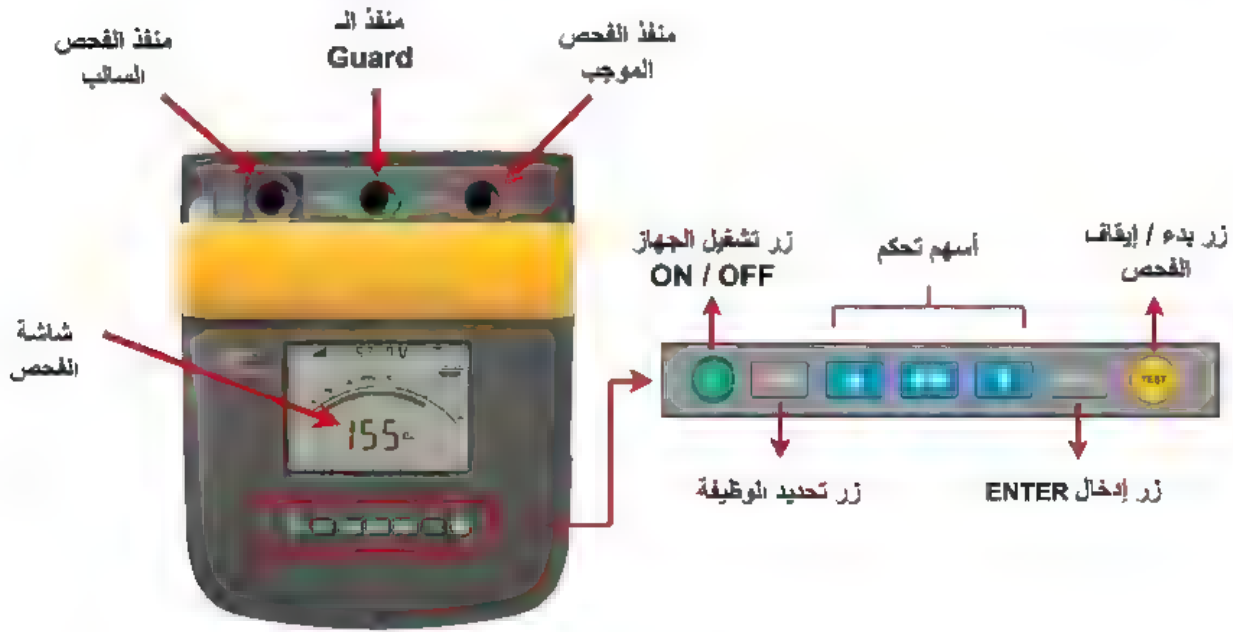


الشكل رقم (2-3-1)

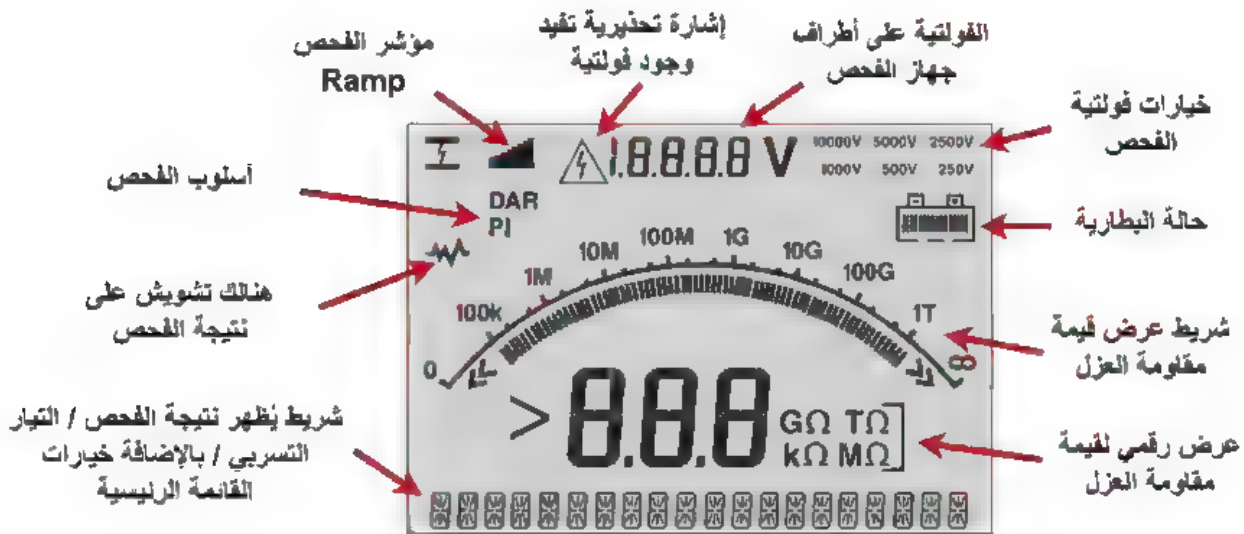
• خطوات الفحص بواسطة هذا الجهاز:

1. التأكد من تطبيق الخطوات (7.1 إلى 7.8) الواردة في فقرة خطوات الفحص من فصل فحص مقاومة العزل.
2. التأكد من أن الدائرة المُراد فحصها غير مُكهربة و عدم وجود احتمالية لكهربتها أثناء الفحص
3. لا تُقَم بلمس دائرة الفحص أثناء إجراء الفحص أو بعده إلا بعد التأكد من عدم وجود فولتية وأن الملفات تم تفريغها من الشحنات تماماً.
4. التأكد من أن أسلاك التوصيل الخاصة بجهاز الفحص (Test leads) وكذلك الـ Crocodile Clips في حالة جيدة وغير متسحة ولا تُعاني من أية أضرار فيزيائية كالشقوق أو الكسور للعزل الخاص بها.

5. التأكد من أن جهاز الفحص المُراد استخدامه مُعاير (Calibrated).
6. قبل البدء بالفحص يُفضّل التعرف على أجزاء الواجهة الرئيسية للجهاز من شاشة ومنافذ وأزرار تحكم بالإضافة لعناصر شاشة العرض لجهاز الفحص كما هو مبين بالشكل (2-3-2).



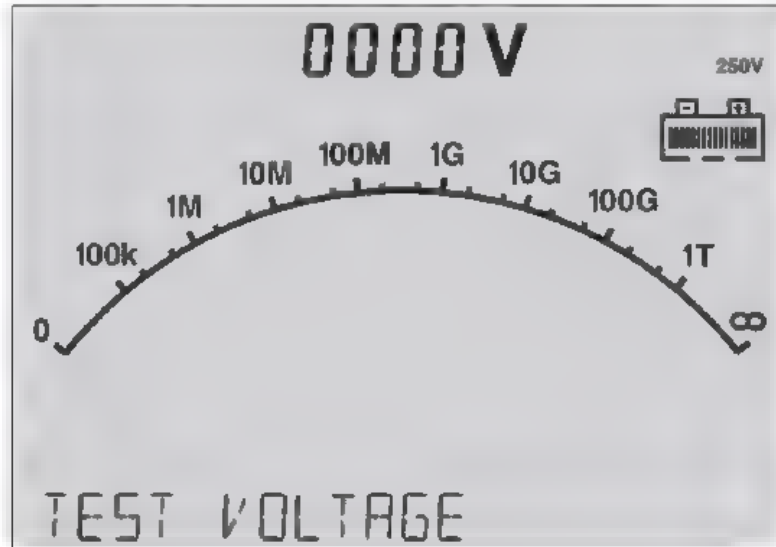
الشكل رقم (2-3-2)



الشكل رقم (2-3-3)

7. إحضار جهاز الفحص إلى الموقع وتوصيل الأسلاك الخاصة به على النحو التالي:
 - 7.1 توصيل السلك الأحمر بالمكان المخصص له على الجهاز (+) منفذ الفحص الموجب.
 - 7.2 توصيل السلك الأخضر بالمكان المخصص له على الجهاز (Guard) منفذ الفحص الأخضر.
 - 7.3 توصيل السلك الأسود بالمكان المخصص له على الجهاز (-) منفذ الفحص السالب.

8. توصيل أسلاك جهاز الفحص (Test Leads) بأطراف المحول وذلك بالرجوع إلى الجدول (2-2) و (2-3) وكذلك الأشكال (2-9) إلى (2-16) من فصل فحص مقاومة العزل وذلك بعد إختيار التوصيلة المناسبة.
9. تشغيل الجهاز بالضغط على زر التشغيل (On/Off) الموضح في الشكل (2-3-2) لتظهر الشاشة الرئيسية المبينة في الشكل (2-3-4).



الشكل رقم (2-3-4)

10. التأكد من أن جهاز الفحص مشحون وأن البطارية مُكتملة، بحيث يُمكن ملاحظة ذلك من شاشة الفحص المبينة في الشكل (2-3-4).

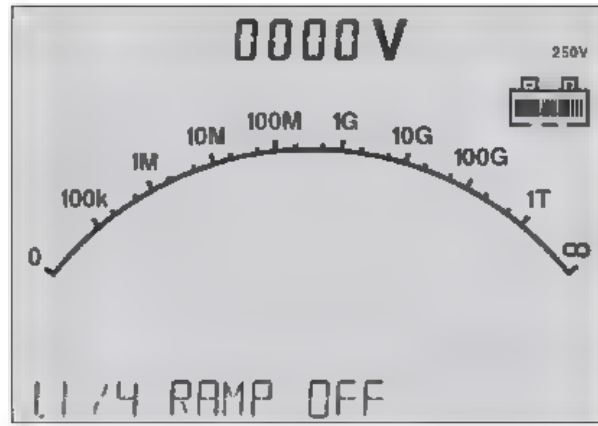
11. تحديد فولتية الفحص:

من الشاشة الرئيسية الظاهرة في الشكل (2-3-4) والتي تكون بالبداية على وضعية تحديد فولتية الفحص (TEST VOLTAGE) نقوم بتحديد الفولتية مباشرة بواسطة الأسهم وذلك لإختيار واحدة من القيم التالية (250, 500, 1000, 2500, 5000, 10000) فولت، أو بالضغط على زر إدخال (Enter) ومن ثم بواسطة الأسهم نقوم بإختيار فولتية الفحص عبر زيادة أو إنقاص (50 V) فولت بكل ضغطة سهم لأعلى أو لأسفل ومن ثم يتم الضغط على زر إدخال (ENTER) لتثبيت الفولتية المُراددة والرجوع للقائمة الرئيسية.

12. إختيار أسلوب الفحص المناسب كالآتي:

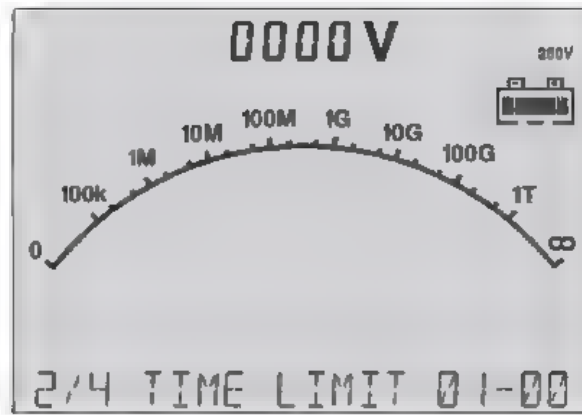
12.1 الفحص بأسلوب الزمن القصير (Spot Test)؛

من القائمة الرئيسية المبينة في الشكل (2-3-3) وبعد تحديد فولتية الفحص المناسبة نقوم بالانتقال لقائمة الخيارات الأخرى وذلك بالضغط على زر (Function) لتظهر لنا الشاشة المبينة في الشكل (2-3-5).



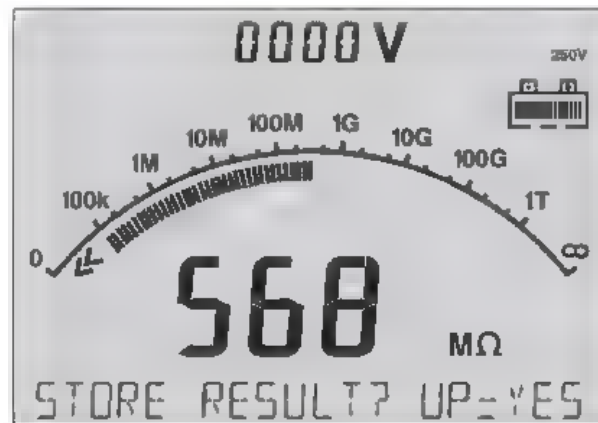
الشكل رقم (2-3-5)

بعد ذلك نقوم بالضبط على السهم لأعلى للانتقال للخيار (2/4 TIME LIMIT OFF) ومن ثم الضغط على زر إدخال (ENTER) ثم بواسطة الأسهم نقوم بتحديد زمن الفحص المناسب بالدقائق ومن ثم الضغط على زر إدخال (ENTER) مرة أخرى كما هو مبين في الشكل (2-3-6) والتي يُظهر زمن الفحص المضبوط على دقيقة واحدة فقط.



الشكل رقم (2-3-6)

وبذلك نكون جاهزين لبدأ الفحص بالضبط مطولاً على زر بدأ الفحص (TEST) المبين في الشكل (2-3-2) لتظهر نتيجة الفحص كما هو مبين بالشكل (2-3-7).

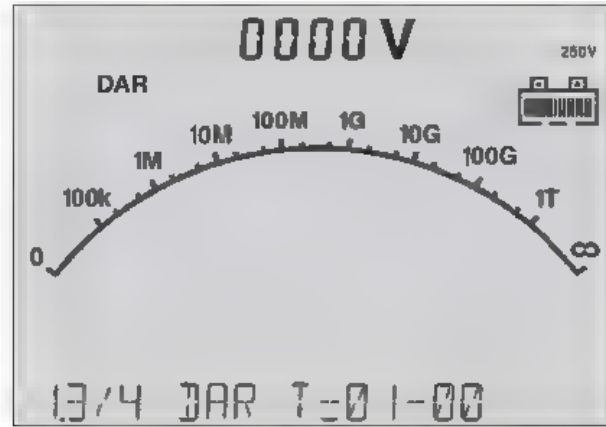


الشكل رقم (2-3-7)

حيث يُمكن حفظ نتيجة الفحص بالضبط على السهم لأعلى.

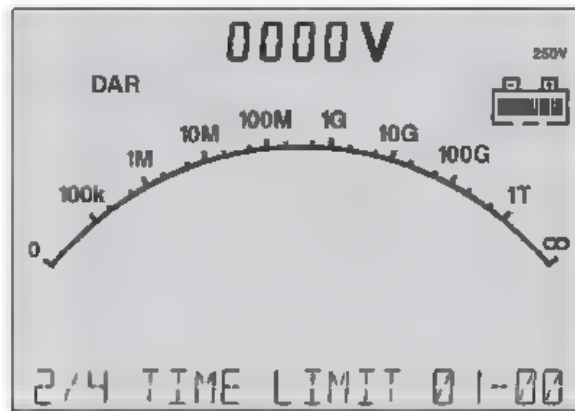
12.2 الفحص بأسلوب مؤشر الإمتصاص (DAR)؛

من القائمة الرئيسية المبينة في الشكل (2-3-3) وبعد تحديد فولتية الفحص المناسبة نقوم بالانتقال لقائمة الخيارات الأخرى وذلك بالضغط على زر (Function) لتظهر لنا الشاشة المبينة في الشكل (2-3-5)، وبعدها نقوم بالضغط على زر إدخال (ENTER) وباستخدام الأسهم نحدد الخيار (1.3/4 DAR T = 1) ومن ثم نقوم بالضغط على زر إدخال (ENTER) لإختياره كما هو مبين بالشكل (2-3-8).



الشكل رقم (2-3-8)

بعدها تظهر الشاشة المبينة في الشكل (2-3-9) والتي من خلالها يُمكن ضبط زمن الفحص والذي يتم ضبطه عادة على دقيقة واحدة.



الشكل رقم (2-3-9)

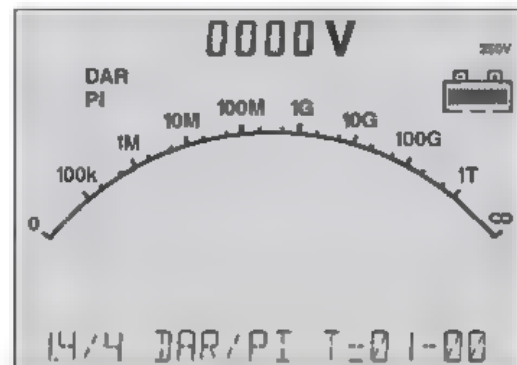
وبذلك نكون جاهزين لبدأ الفحص بالضغط مطولاً على زر بدأ الفحص (TEST) المبين في الشكل (2-3-2) لتظهر نتيجة الفحص كما هو مبين بالشكل (2-3-10).



الشكل رقم (2-3-10)

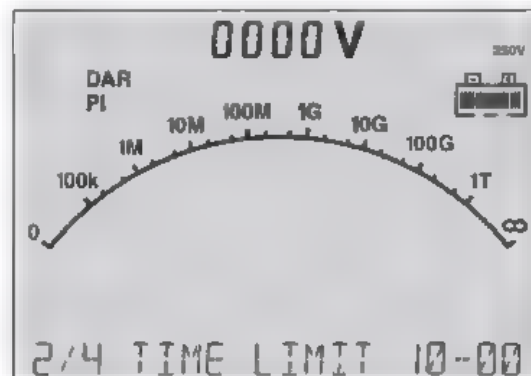
12.3 الفحص بأسلوب مؤشر الإمتصاص (DAR) ومؤشر الإستقطاب (PI) معاً؛

من القائمة الرئيسية المبينة في الشكل (2-3-3) وبعد تحديد فولتية الفحص المناسبة نقوم بالإنقال لقائمة الخيارات الأخرى وذلك بالضغط على زر (Function) لتظهر لنا الشاشة المبينة في الشكل (2-3-5)، وبعدها نقوم بالضغط على زر إدخال (ENTER) وباستخدام الأسهم نحدد الخيار (1.4/4 DAR/PI T = 10) ومن ثم نقوم بالضغط على زر إدخال (ENTER) لإختياره كما هو مبين بالشكل (2-3-11).



الشكل رقم (2-3-11)

بعدها تظهر الشاشة المبينة في الشكل (2-3-12) والتي من خلالها يُمكن ضبط زمن الفحص والذي يتم ضبطه عادة على عشر دقائق.



الشكل رقم (2-3-12)

وبذلك نكون جاهزين لبدأ الفحص بالضغط مطولاً على زر بدأ الفحص (TEST) المبين في الشكل (2-3-2) لتظهر نتيجة الفحص كما هو مبين بالشكل (2-3-13).



الشكل رقم (2-3-13)

12.4 الفحص بأسلوب مؤشر الإمتصاص (DAR) وفقاً للمعايير الصينية؛

تختلف المعايير الصينية عن باقي المعايير فيما يخص هذا الأسلوب حيث يكمن الاختلاف في العادلة الخاصة لإحتساب مؤشر الإمتصاص (DAR)، حيث أن المعايير الصينية تعتمد المعادلة التالية:

$$DAR \text{ or } AI = \frac{R_{60s}}{R_{15s}} = \frac{I_{15s}}{I_{60s}} \quad (2.3.1)$$

حيث؛

. مؤشر الإمتصاص – Dielectric Absorption Ratio or Absorption Index.	<i>DAR or AI</i>
: قيمة مقاومة العزل عند الدقيقة الأولى من الفحص (MΩ)	<i>R_{60s}</i>
: قيمة مقاومة العزل عند الثانية (15s) من الفحص (MΩ).	<i>R_{15s}</i>
: قيمة التيار المتسرب من خلال العازل عند الثانية (15s) من الفحص (μA).	<i>I_{15s}</i>
: قيمة التيار المتسرب من خلال العازل عند الدقيقة الأولى من الفحص (μA).	<i>I_{60s}</i>

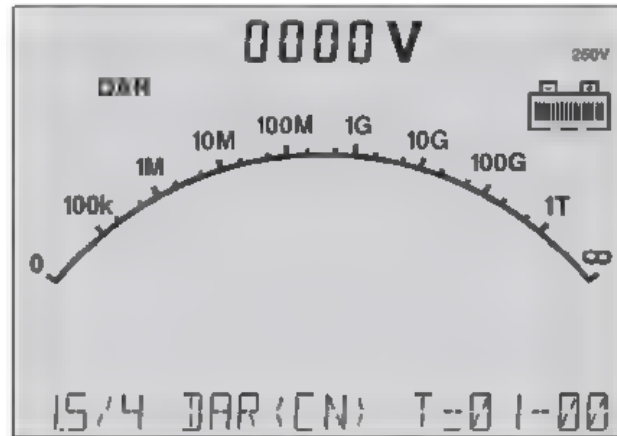
أما أغلب المعايير والمراجع فقد إعتمدت المعادلة التالية:

$$DAR \text{ or } AI = \frac{R_{60s}}{R_{30s}} = \frac{I_{30s}}{I_{60s}} \quad (2.3.2)$$

حيث؛

. مؤشر الإمتصاص – Dielectric Absorption Ratio or Absorption Index.	<i>DAR or AI</i>
: قيمة مقاومة العزل عند الدقيقة الأولى من الفحص (MΩ)	<i>R_{60s}</i>
: قيمة مقاومة العزل عند الثانية (30s) من الفحص (MΩ)	<i>R_{30s}</i>
: قيمة التيار المتسرب من خلال العازل عند الثانية (30s) من الفحص (μA).	<i>I_{30s}</i>
: قيمة التيار المتسرب من خلال العازل عند الدقيقة الأولى من الفحص (μA).	<i>I_{60s}</i>

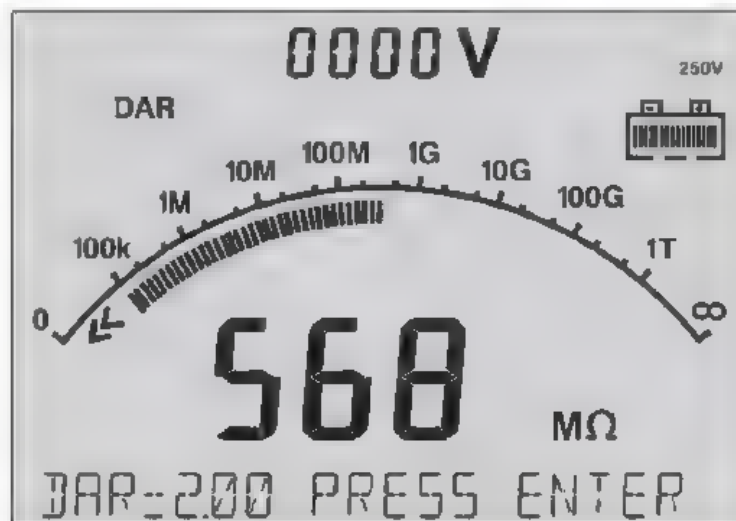
ولإختيار الفحص نقوم بالآتي من القائمة الرئيسية المبينة في الشكل (2-3-3) وبعد تحديد فولتية الفحص المناسبة نقوم بالانتقال لقائمة الخيارات الأخرى وذلك بالضغط على زر (Function) لتظهر لنا الشاشة المبينة في الشكل (2-3-5)، وبعدها نقوم بالضغط على زر إدخال (ENTER) وباستخدام الأسهم نحدد الخيار (1.5/4 DAR (CN) T = 1) ومن ثم نقوم بالضغط على زر إدخال (ENTER) لإختياره كما هو مبين بالشكل (2-3-14).



الشكل رقم (2-3-14)

بعدها تظهر الشاشة المبينة في الشكل (2-3-9) والتي من خلالها يُمكن ضبط زمن الفحص والذي يتم ضبطه عادة على دقيقة واحدة وبذلك نكون جاهزين لبدأ الفحص بالضغط مطولاً على زر بدأ الفحص (TEST) المبين في الشكل (2-3-2) لتظهر نتيجة الفحص كما هو مبين بالشكل (2-3-15).

تحذير: وفي حال أردت إيقاف الفحص (حقن الفولتية) قبل إنتهاء وقت الفحص لأي سبب من الأسباب نقوم بالضغط على زر فحص (TEST).



الشكل رقم (2-3-15)

كتاب الفحوصات التشخيصية للمحولات الكهربائية (النسخة الإلكترونية)
م. محمد صبحي عساف



الفصل الثالث

فحص مقاومة الملفات

Winding Resistance Test (WR)



فحص مقاومة الملفات

Winding Resistance Test

يُعبّر فحص مقاومة ملفات المحول (**Winding Resistance Measurement - WRM**) عن مقاومة المسار الحامل للتيار داخل المحول الملفات النحاسية في أغلب الأحيان ، هذه المقاومة التي تُعطي تصوّر عن الحالة الداخلية للملفات كوجود قطع كلي أو جزئي للملفات أو غيرها من الأضرار الفيزيائية التي قد تلحق بالملفات أو مُغيّر الخطوة (**Tap-changer**)، كما ويُمكن إستخدام قيمة هذه المقاومة في حساب الصياعات المادية أو النحاسية سابقة الذكر لهذا المحول. ويُطلق أيضاً على هذا الفحص إسم (**Static Cold Resistance Measurement**) وتم وضع كلمة (**Static**) للدلالة على أن هذا الفحص يجري بالوضع الإستاتيكي أي بدون وجود حركة وكذلك للتفرقة بينه وبين فحص (**Dynamic**) والذي يتم من خلاله قياس قيمة المقاومة أثناء حركة مُغيّر الخطوة (**Tap-changer**) من النوع (**OLTC**) للتأكد من سلامته، وفيما يُخص كلمة (**Cold**) فهي للدلالة على أن هذا الفحص يتم إجراؤه بعد وصول المحول إلى حالة الإستقرار الحراري كما سيتم شرحه لاحقاً في هذا الفصل.

وكما هو معلوم وعند إختيار الموصلات الخاصة بملفات المحول فيما إذا كانت نحاسية أو من الألمنيوم فإن قيمة المقاومة الكهربائية (**Resistance**) من القيم الهامة و المحورية، حيث تُعد من القيم المؤثرة في التحكم بكمية التيار المار في الملفات وفقاً لقيم التيار التصميمية بالإضافة إلى التحكم بمستوى ضياعات الحمل (**Load Losses**) لهذا المحول، وقياس هذه المقاومة بشكل دوري بقي من حدوث غطب للمحول على المدى الطويل ويُقلل من الطاقة الضائعة على شكل حرارة نتيجة للزيادة في قيمة هذه المقاومة كما و يُعتبر هذا الفحص من الفحوصات غير التدميرية (**Non-destructive test**) أي أنه لا يُؤثر على سلامة العزل وذلك لأن مقدار فولتية الفحص أقل من مقدار الفولتية الإسمية الخاصة بالمحول.

وتتلخص سلامة أي محول في سلامة ثلاثة أنظمة داخلية للمحول وهي نظام العزل والنظام الميكانيكي والنظام الحراري، حيث أن أي فشل في أي من هذه الأنظمة سيؤدي إلى فشل المحول بالكامل، وهذا الفحص يُمكن من الكشف عن سلامة النظام الميكانيكي والحراري للمحول وذلك بالكشف عن الأعطال التي تحدث للمسار الحامل للتيار داخل المحول كالملفات (**Winding**) أو مُغيّر الخطوة (**Tap changer**).

1. متى يتم إجراء هذا الفحص ولماذا؟

هناك عدة أسباب تدفعنا لإجراء هذا الفحص ومن هذه الأسباب ما هو روتيني للتأكد من سلامة المحول أو تشخيصي لتحديد الأعطال في المحول (وهو محال بحثنا في هذا الكتاب) أو لأسباب خاصة أخرى، وتتلخص هذه الأسباب بالآتي:

- 1.1 في المصنع لضبط الجودة المصنعية (Quality Control - QC) وكذلك يُعتبر من فحوصات القبول المصنعية (Factory Acceptance Test - FAT) للتأكد من سلامة المحول ومطابقته للتصميم قبل نقله للموقع.
- 1.2 في الموقع قبل كهرية المحول للمرة الأولى (Transformer first energization) كأحد فحوصات القبول الموقعية (Site Acceptance Test - SAT) للتأكد من سلامة المحول بعد نقله وتركيبه في الموقع.
- 1.3 قبل كهرية المحول (Transformer energization) بعد عمليات الصيانة المختلفة في الموقع.
- 1.4 قبل كهرية المحول (Transformer energization) بعد تغيير وضعية مُغيّر الخطوة (Tap-changer) من نوع (De-energized Tap Changer DETC or OCTC) وذلك لضمان عدم وجود فتح بدائرة الملفات الداخلية للمحول (Open circuit).
- 1.5 لحساب مُركبة الضياعات المادية أو النحاسية (I^2R) للموصلات الخاصة بالمحول ومعرفة الكفاءة، حيث تُشكل هذه المُركبة الجزء الأكبر من قيمة ضياعات الحمل (Load Losses).
- 1.6 قبل فحص إرتفاع الحرارة (Temperature Rise) حيث تُستخدم قيمة هذا الفحص - مقاومة الملفات - لحساب درجة حرارة الملفات في نهاية فحص الـ (Temperature Rise).
- 1.7 بشكل روتيني (Routine test) وذلك للكشف عن وضع المحول الحالي وإستخدام نتيجة هذا الفحص كمرجع (Reference value).
- 1.8 تحديد الأعطال داخل المحول (Fault detection - Diagnostic test)، وهو ما سيتم تناوله في هذا الفصل.

2. الدوافع التشخيصية لعمل هذا الفحص وما هي الأعطال التي يتم الكشف عنها

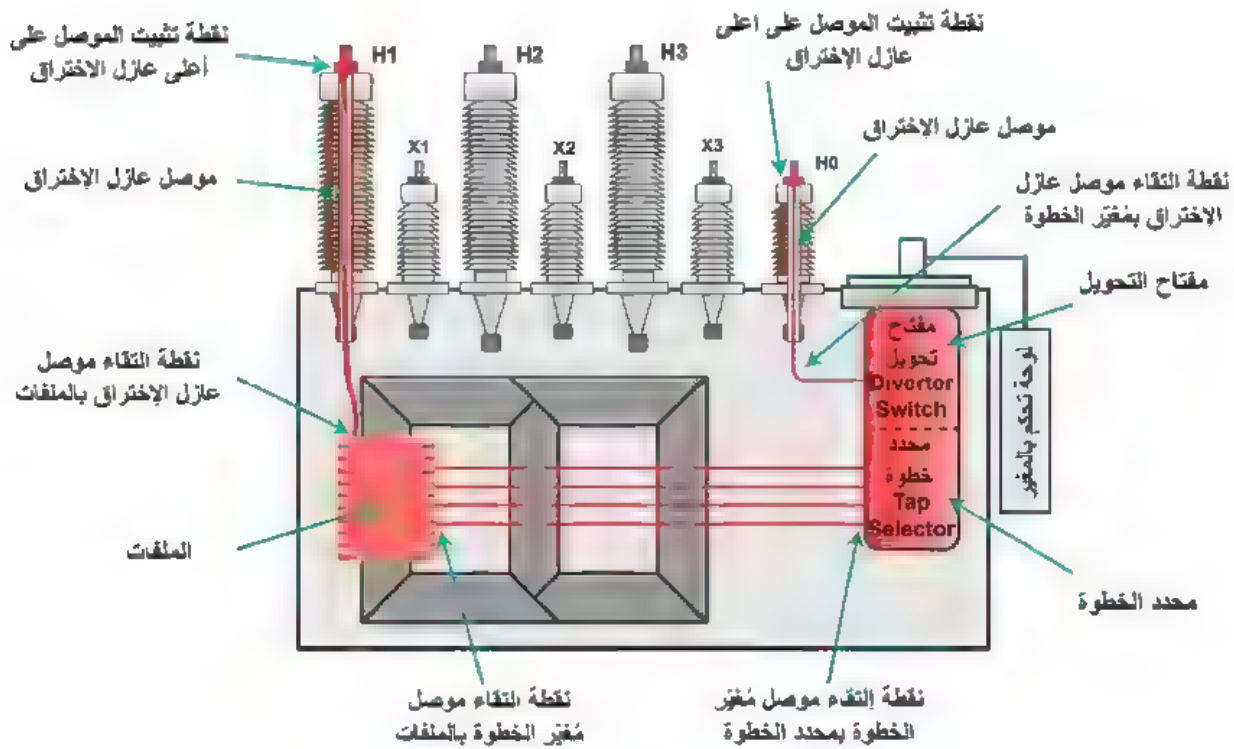
يتم اللجوء لعمل هذا الفحص في حال إرتفاع درجة حرارة ملفات المحول أو حدوث فصل قسري للمحول (Trip) نتيجة لإرتفاع درجة الحرارة أو في حال ظهور نتائج غير مُرضية لفحص الغازات الذائبة في الزيت (Dissolved Gas Analysis - DGA) خاصة عند ظهور غازات الـ (الميثان - CH_4 و الإيثان - C_2H_6 و الإيثيلين - C_2H_4) مُجمعة والتي يُطلق عليها غازات إحماء المعدن (Hot metal gases) والناجمة عن إحماء المسار الحامل للتيار في المحول كالنحاس أو الألمنيوم.

كما ويُعدّ تعرّض المحول لإجهاد ميكانيكي كالإهتزازات أو النقل أو الصدمات، بالإضافة إلى تعرّض المحول إلى إجهاد ناتج عن عطل كهربائي مثل الاعطال الأرضية (Earth Faults) وما ينتج عنها من تيارات قصر ذات قيم مرتفعة من الأمور التي تدفعنا لعمل هذا الفحص بهدف تشخيصي.

ومن الأعطال التي يتم الكشف عنها من خلال هذا الفحص:

- وجود قطع كلي أو جزئي في ملفات المحول (Open circuit or Crack)، مما يؤدي لارتفاع قيمة المقاومة المُقاسة من خلال هذا الفحص.
- وجود قصر (Short circuit) بين لفات الملفات المختلفة من المحول أو بين اللفات من نفس الملف، مما يؤدي لإنخفاض قيمة المقاومة المُقاسة من خلال هذا الفحص.
- وجود نقاط توصيل رديئة (Poor electrical connections) في المحول، مثل وجود إرتخاء (Loose) في نقاط توصيل موصلات عوازل الإختراق أو كما تُسمى جُلَب المحول (Bushing leads) بملفات المحول، أو وجود إرتخاء في نقاط توصيل ملفات المحول بمُغَيِّر الخطوة (Tap changer)، مما يؤدي لارتفاع قيمة المقاومة المُقاسة من خلال هذا الفحص.
- عطل داخلي في عمل مُغَيِّر الخطوة (Tap Changer) أو تأكل أو تأكسد ملامساته، مما يؤدي لارتفاع قيمة المقاومة المُقاسة من خلال هذا الفحص.

ويُبين الشكل (3-1) مثال على المسار الحامل للتيار داخل المحول أثناء إجراء هذا الفحص والذي يُبين أهم المناطق التي يستهدفها هذا الفحص والموصحة باللون الأحمر، حيث تُمثّل نقاط الالتقاء المُشار إليها في الشكل المناطق الأكثر شيوعاً كمسببات لارتفاع قيمة مقاومة الملفات إلى جانب مُغَيِّر الخطوة (Tap-changer) نفسه.



الشكل رقم (3-1)

3. فلسفة الفحص

قبل الخوض في تفاصيل الفحص لا بُد من الإجابة عن تساؤل هام وهو "ما الفرق بين المقاومة المُقاسة من خلال هذا الفحص وهي مقاومة التيار الثابت (DC Resistance) ومقاومة التيار المتردد (AC Resistance) التي يتم قياسها باستخدام تيار وفولتية مترددة أو أثناء التحميل الطبيعي للمحول؟"

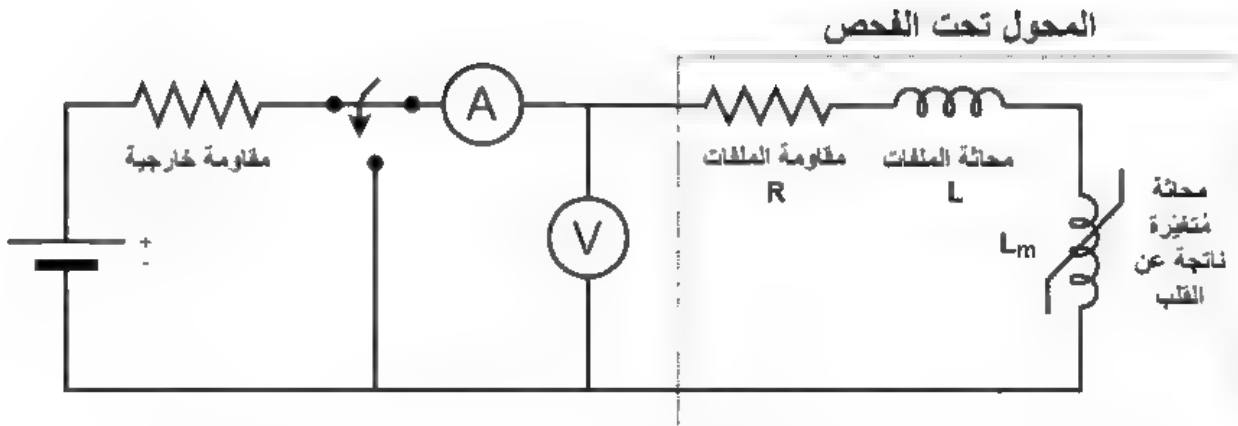
كما هو معلوم أن مقاومة التيار المتردد للمحول (AC Resistance) تتكون من مُركبتين إحداهما تُمثل الجزء المادي من المقاومة (R)، والأخرى تُمثل الجزء التخيلي أو ما يُسمى بالـ (Imaginary part) وهي المُفاعلة الحثية (XL)، ومنه فإن هذه المقاومة تُدل على كثير من المعلومات الخاصة بمُركبات ضياعات الحمل داخل المحول من ضياعات مادية أو نحاسية (Resistive or Copper Losses) بالإضافة إلى الضياعات الشاردة (Stary Losses) والمُتمثلة بضياعات التيارات الدوامية في الملفات (Winding Eddy Losses) وضياعات التيارات الدوّارة في الموصلات المتوازية (Parallel Conductors Circulating Current Losses) وأيضاً الضياعات الشاردة في الخزان (Tank Stray Losses)، أما من الناحية التشخيصية وفيما يُخص هذا الفحص فإن هذه المقاومة (AC Resistance) لا يُمكن الاستفادة منها هنا البتة، مع العلم أن هذه المقاومة يتم إستخراجها والإستفادة منها في فحوصات أخرى مثل فحص الإستجابة الترددية للضياعات الشاردة (Frequency Response of Stray Losses - FRSL).

أما فيما يُخص المقاومة المُقاسة في هذا الفحص فهي مقاومة التيار الثابت (DC Resistance) والتي تُدل على الضياعات المادية أو النحاسية ($Copper Losses - I^2R$) فقط، وكذلك تُعطي تصوّر عن وضع الموصلات الراهن وهو ما نرجوه من هذا الفحص.

ملحوظة (3-1): إن مقاومة التيار المتردد (AC Resistance) تُحوي بداخلها أيضاً مقاومة التيار الثابت (DC Resistance) لذلك تكون قيمتها أكبر قليلاً.



لقياس قيمة مقاومة التيار الثابت (DC Resistance) فإن الطريقة المُتعارف عليها هي بحقن تيار ثابت (DC current) وقياس الهبوط بالفولتية على أطراف المقاومة ومن ثم حساب هذه المقاومة وفقاً لقانون أوم (Ohm's Law)، ولكن هذه الطريقة يُمكن تطبيقها بكفاءة عالية وسهولة عند قياس مقاومة مادية فقط (R). أما إذا إقترن وجود هذه المقاومة بوجود محاثّة (Inductance) فإن ذلك من شأنه زيادة الأمر صعوبة خاصة إذا كانت هذه المحاثّة ذات قلب حديدي كما هو الحال في المحولات وكما هو موضح بالشكل (3-2).



الشكل رقم (2-3)

نتيجة لذلك هنالك عاملان رئيسيان يُعيقان القيام بهذا الفحص بسهولة ويُسر وهما:

- ✓ التعيُّر في قيمة التيار مع الزمن عند بداية الفحص نتيجة لوجود محاثة الملفات (**Winding Self Inductance - L**) والتي تُقاوم مرور هذا التيار بالبداية ثم تستقر قيمته بعد ذلك.
- ✓ التغَيُّر في قيمة المحاثة الناتجة عن القلب الحديدي للمحول مع الزمن (**Mutual Inductance - L_m**) والناتج عن عدم تشبُّع (**Saturation**) القلب الحديدي للمحول.

وهذان العاملان ينتج عنهما مُركبتين لهبوط الفولتية (**Drop Voltage**) تُضافان إلى الهبوط في الفولتية على أطراف المقاومة (**RI**) وهي القيمة المطلوبة فقط، مما يجعل قياس مقاومة هذه الملفات غير دقيق نتيجة لتذبذب قيمة الفولتية كما هو مُبين بالمعادلة التالية.

$$V = RI + L \frac{dI(t)}{dt} + I \frac{dL_m(t)}{dt} \quad (3.1)$$

حيث؛

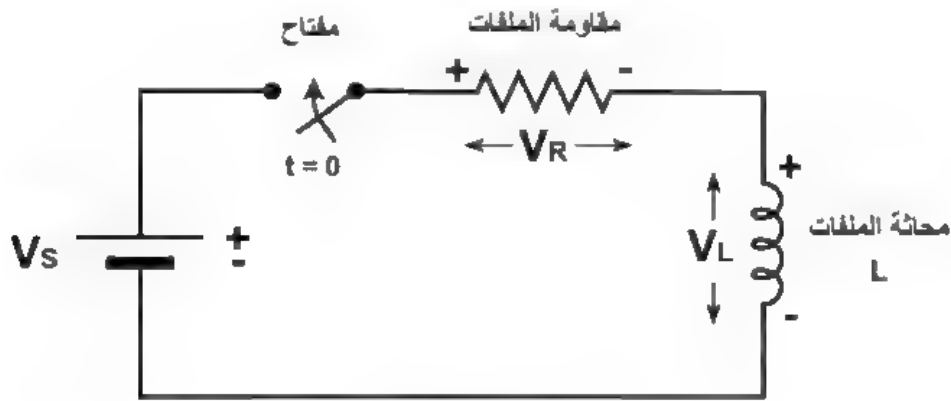
- RI : تُمثّل مُركبة الهبوط في الفولتية الناتج عن لمقاومة وهي القيمة المطلوبة لحساب هذه المقاومة.
- $L \frac{dI(t)}{dt}$: تُمثّل مُركبة الهبوط في الفولتية الناتجة عن التغَيُّر في قيمة التيار نتيجة وجود محاثة (**L**) الملفات.
- $I \frac{dL_m(t)}{dt}$: تُمثّل مُركبة الهبوط في الفولتية الناتجة عن التغَيُّر في قيمة المحاثة المُشتركة الناتجة عن عدم تشبُّع القلب الحديدي للمحول (**L_m**).

لذلك يُعد فحص مقاومة ملفات المحول من الفحوصات التي لا يُمكن إيجاد قيمتها لحظياً، بل يجب التحلُّص من قيمة المحاثة الناتجة عن القلب الحديدي والوصول إلى قيمة تيار فحص ثابتة حتى يتسنى لنا أخذ القراءة بنسبة خطأ تؤول للصفر.

ولزيادة الفهم سيتم شرح هذه العوامل المؤثرة على الفحص:

• العامل الأول: المُرَكَّبَة الناتجة عن التغيُّر في قيمة التيار مع الزمن عند بداية الفحص.

يُمكن التعبير عن ملفات المحول بشكل بسيط - على إعتبار أن القلب هوائي - على أنها مقاومة موصولة على التوالي مع محاثّة (Series R-L circuit) بحيث تكون قيمة المقاومة والمحاثّة ثابتة مع الزمن كما هو مُبين بالشكل (3-3).



الشكل رقم (3-3)

وبالتالي وكما هو معلوم فإن محاثّة الملفات (L) في حالة التيار الثابت (DC) يُمكن تمثيلها على شكل وصلة قِصر (Short Circuit) أي أنها بلا تأثير على الدائرة ولكن هذا الكلام غير دقيق 100%، فالرجوع الى الدائرة المُبيّنة في الشكل (3-3) وعند إغلاق المفتاح عند ($t = 0$) وتطبيق الفولتية على المقاومة والمحاثّة فإن قيمة التيار تكون مساوية للصفر وتبدأ بالارتفاع تدريجياً حتى الوصول إلى إلى قيمة مُعيّنة والثبات، ويَعود ذلك بسبب الفولتية المُعاكسة المُتولدة من المحاثّة وفقاً لقانون ليزر بسبب تصاعد قيمة الفيض المغناطيسي في البداية وهذا ما يُسمى بالـ **Back Electro-Motive Force** (**BackEMF**)، ويُمكن أن نرّمز لهذه الفولتية المُتولدة على أطراف المحاثّة بـ (V_L) والتي تُعاكس الفولتية الرئيسية المُطبّقة على الدائرة (V_S) وتساويها بالمقدار مما يجعل الفولتية على أطراف المقاومة (V_R) مساوية للصفر في لحظة إغلاق المفتاح، وبعد ذلك تبدأ الفولتية المُعاكسة على أطراف المحاثّة (V_L) بالهبوط والفولتية على أطراف المقاومة (V_R) بالارتفاع إلى أن تصل الفولتية على أطراف المحاثّة للصفر بعد فترة من الزمن وتصبح الفولتية على أطراف المقاومة مساوية لفولتية المصدر ($V_R = V_S$) مما يؤدي لثبات قيمة التيار المار في الدائرة، ويُمكن ملاحظة ما سبق بتطبيق قانون كيرتشف للفولتية (KVL) على الدائرة المُبيّنة في الشكل (3-3) لتنتج المعادلة التالية.

$$V_S - (V_R + V_L) = 0 \quad (3.2)$$

$$V_R = V_S - V_L$$

حيث؛

$$V_L = L \frac{di}{dt}$$

و

$$V_R = R \cdot I$$

ومنه تُصبح المعادلة كالآتي:

$$R \cdot I \uparrow \uparrow = V_S - L \frac{di}{dt} \downarrow \downarrow \quad (3.3)$$

حيث؛

$R \cdot I$: الفولتية على أطراف المقاومة المُراد حساب قيمتها (V_R) والتي ترتفع مع الزمن $\uparrow \uparrow$.

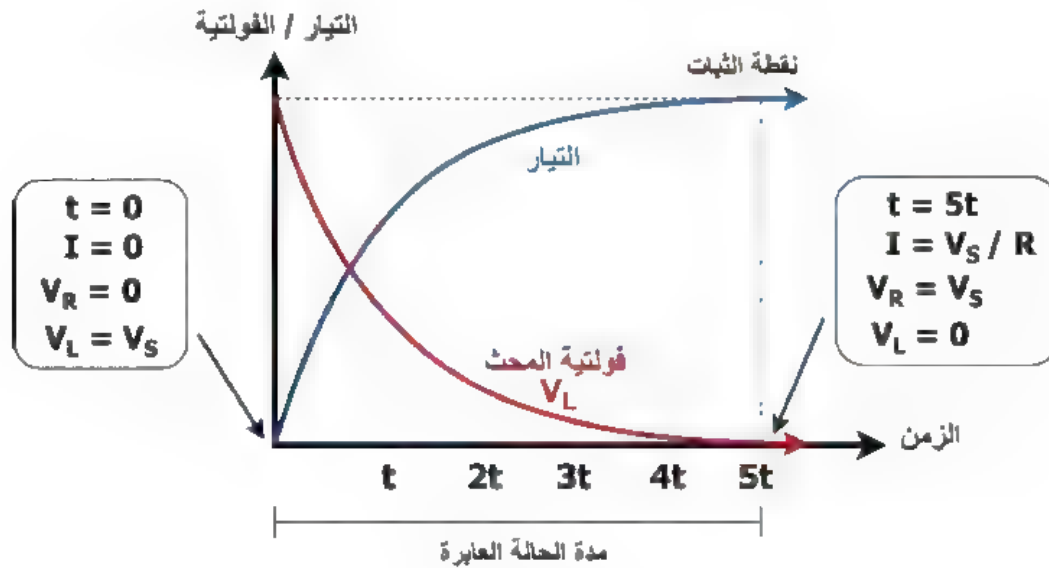
V_S : فولتية المصدر.

$L \frac{di}{dt}$: الفولتية على أطراف المحثة (V_L) والتي تنخفض مع الزمن $\downarrow \downarrow$.

يُمكن ملاحظة إختلاف قيمة الفولتية المُحصّلة المُطبقة على المقاومة وفقاً للتغيّر في قيمة التيار المار في الدائرة نتيجة لوجود محثة الملفات في الدائرة كما هو مُبين في المعادلة (3.3) السابقة، ومنها كذلك يُمكن صياغة معادلة تغيّر التيار مع الزمن كالآتي:

$$I(t) = \frac{V}{R} (1 - e^{-Rt/L}) \quad (3.4)$$

حيث (t) يُمثل الزمن وهو النسبة الناتجة عن قسمة قيمة المحثة بالهنري (L) على قيمة المقاومة بالأوم (R)، وعادةً ما يتم الوصول إلى حالة إستقرار التيار لدوائر (Series R-L) عند ($5t$) وقد تصل لـ ($9t$) حيث تكون دقة القياس قرابة ($\pm 1\%$) عند ($5t$) وقرابة ($\pm 0.1\%$) عند ($9t$). ومنه يُمكن ملاحظة تأثير قيمة المحثة والمقاومة على زمن إستقرار التيار كما هو مُبين بالشكل (3-4).



الشكل رقم (3-4)

مما سبق يُمكن ملاحظة المُركبة غير المرغوب بها التي يُضيفها التغيّر في التيار على معادلة الفولتية التي يتم إحساب قيمة المقاومة من خلالها كما هو مُبين في المعادلة (3.5) التالية.

$$V = R I + L \frac{di}{dt} \quad (3.5)$$

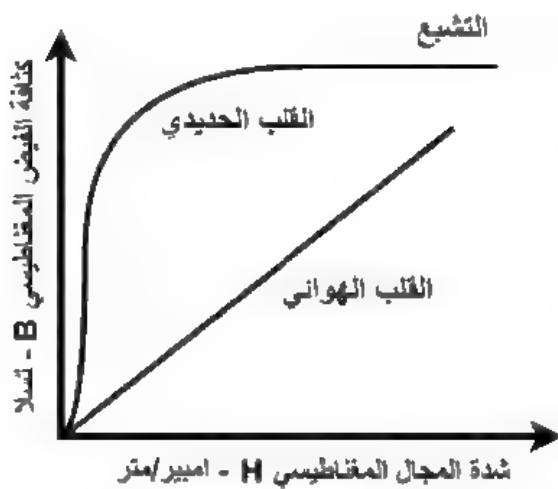
حيث؛

$\frac{di}{dt}$: تُعتبر عن مُعدل التغير في تيار الملفات مع الزمن، والتي تصل لأدنى قيمة لها - قرابة الصفر - بعد فترة من الزمن.

وللتخلص من هذه المُركبة يجب الإنتظار لحين إنتهاء هذه الحالة العابرة بالإضافة إلى المُحافظة قدر الإمكان على قيمة تيار فحص ثابتة طوال فترة الفحص، مما يجعل مُعدل تغير التيار مع الزمن يؤول إلى الصفر ($\frac{di}{dt} = 0$) وذلك بدوره يقوم بإلغاء المُركبة المُضافة إلى المعادلة (3.5)، ويؤدي إلى ثبات قيمة الهبوط بالفولتية على أطراف المقاومة ومنه ثبات قيمة المقاومة المُقاسة.

• العامل الثاني: المُركبة الناتجة عن التغير في قيمة المحاثّة الناتجة عن القلب الحديدي للمحول مع الزمن.

إن سلوك ملفات المحول والتي يُمكن تمثيلها بدائرة (Series R-L) يختلف بحالة وجود قلب حديدي عن حالة عدم وجوده أي في حال إعتبار أن قلب المحول هوائي كما هو في الشرح السابق، وهذا بدوره يزيد الأمر تعقيد بحيث سيؤدي إلى تصاعد تيار الدائرة بشكل أبطأ نتيجة لظهور مُركبة هبوط بالفولتية أخرى للمعادلة (3.5) السابقة سببها وجود محاثّة ذات قيمة مُتغيرة مع الزمن نتيجة لعدم تشبّع القلب الحديدي أو كما تُسمى بالمحاثّة المُشتركة (L_m - Mutual inductance) إلى جانب المحاثّة الداخلية للملفات نفسها (L - Winding Self Inductance) ذات القيمة الثابتة والتي تم شرحها مسبقاً والمُبيّنة في الشكل (3-2). ففي حال إعتبار وجود قلب حديدي للمحول كما هو الحال في أغلب محولات القدرة المُستخدمة عالمياً، تظهر محاثّة ذات قيمة مُتغيرة (L_m) نتيجة لإختلاف خصائص منحنى التشبّع (B-H Curve) الخاص بالقلب الحديدي عن خصائص نظيره للقلب الهوائي والذي يتلخص في أن منحنى التشبّع (B-H Curve) الخاص بالقلب الهوائي خطي (Linear)، أما منحنى التشبّع الخاص بالقلب الحديدي فهو غير خطي (Non-linear) كما هو مُبين في الشكل (3-5).



الشكل رقم (3-5)

حيث أن قيمة هذه المحاثّة المُشتركة (L_m) الناتجة عن القلب الحديدي أو الهوائي تعتمد على ميل منحنى التشبّع، ففي حالة القلب الهوائي ونظراً لخطية منحناه - ميل ثابت - فإن قيمة المحاثّة المُشتركة (L_m) تكون ثابتة وذات قيمة قليلة جداً وتكون معادلة الهبوط في الفولتية كما هو مُبين بالمعادلة (3.5)، أي أنها تتكون من مُركبتين فقط ولا تحتوي سوى على محاثّة الملفات نفسها (L). أما فيما يخص القلب الحديدي ذو منحنى التشبّع غير الخطي - ميل مُتغير - فإن قيمة المحاثّة المُشتركة

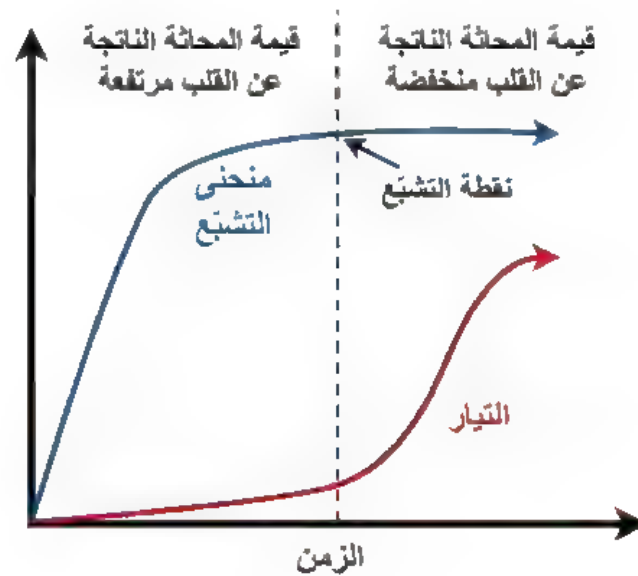
(L_m) تكون مُتغيِّرة بتغيُّر الميل مما يُضيف مُركبة ثالثة لمعادلة الهبوط بالفولتية تعتمد قيمتها على معدل تغيُّر قيمة هذه المحاثّة المُشتركة الناتجة عن القلب الحديدي مع الزمن كما هو مُبين بالمعادلة (3.6).

$$V = R I + L \frac{dI(t)}{dt} + I \frac{dL_m(t)}{dt} \quad (3.6)$$

حيث؛

$\frac{dL_m(t)}{dt}$: تُعبّر عن مُعدل التغيُّر في المحاثّة السّتجة عن القلب الحديدي مع الزمن، والتي تصل لأدنى قيمة لها مع الثبات عند تشبُّع القلب الحديدي للمحول.

وكما يظهر في الشكل (3-5) فإن ميل المنحنى الخاص بالقلب الحديدي يتناقص مع الزمن إلى أن يصل للصفر عند تشبُّع القلب الحديدي، والذي بدوره يؤدي أيضاً لتناقص مقدار المحاثّة المُشتركة الناتجة عن هذا القلب (L_m) ليُصبح الحال كما وأن القلب هوائي لا حديدي. وحالة التشبُّع هذه هي ما نرنو إليه حتى يتسنى لمعادلة الهبوط بالفولتية الثبات ومنه ثبات قيمة مقاومة الملفات.



الشكل رقم (3-6)

وبذلك يُمكن إعتبار قيمة المحاثّة المُشتركة المُتغيِّرة الناتجة عن القلب الحديدي (L_m) العامل الثاني من عوامل عدم إستقرار قيمة مقاومة ملفات المحول حيث تصل هذه المحاثّة إلى أدنى قيمة لها بشكل ثابت عند تشبُّع القلب الحديدي، مما يتيح لتيار الفحص بالسرّيان دون عوائق والوصول إلى أعلى قيمة له والثبات كما هو مُبين في الشكل (3-6)، والذي يوضّح العلاقة بين قيمة تيار الفحص ومنحنى التشبُّع وقيمة المحاثّة المُشتركة من جهة أُخرى. حيث يُمكن الملاحظة في ذات الشكل أن المحاثّة الناتجة عن هذا القلب تسلك سلوك المفتاح الكهربائي، حيث أنها تعيق سريان التيار عندما تكون قيمتها مرتفعة أي قبل تشبُّع القلب الحديدي وتسمح للتيار بالسرّيان عند هبوط قيمتها بعد تشبُّع القلب الحديدي.

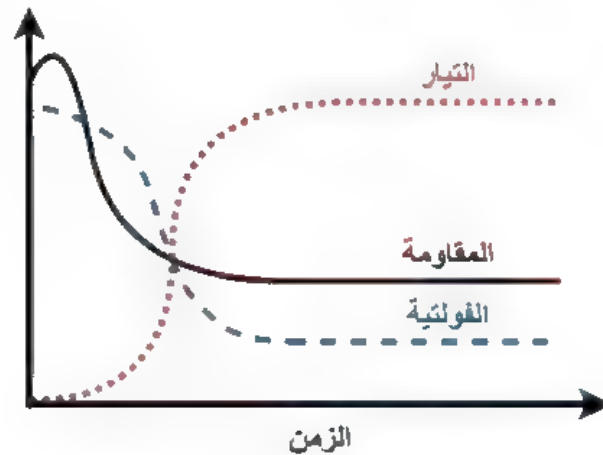
ومن الشرح السابق يُمكن إستخلاص أن المحاثّة المُشتركة (Lm) ذات قيمة تعتمد على الزمن بالإضافة إلى قيمة التيار (كلما كان تيار الفحص أكبر كلما كان الوصول إلى نقطة التشبّع أسرع)، بالإضافة إلى ما سبق لا تُد من الإشارة إلى فولتية الفحص كأحد العوامل التي تعتمد عليها قيمة المحاثّة المُشتركة (Lm) إلى جانب العاملين المذكورين مسبقاً وهما الزمن و تيار الفحص، حيث أنه كلما إرتفعت الفولتية قلّ الزمن للحصول على الفيض المغناطيسي المؤدي لتشبّع القلب الحديدي للمحول كما هو مُبين في المعادلة (3.7) التالية:

$$\text{Magnetic Flux} = \text{Voltage} \times \text{Time} \quad (3.7)$$

وللتخلّص من هذه المُركّبات غير المرغوب بها والتي تُعيق قياس قيمة المقاومة بسهولة ويُسر يُمكن القيام بالآتي:

- ✓ الإنتظار لحين إنتهاء هذه الحالة العابرة "الحالة العابرة الأولى الخاصة بسلوك دائرة ال (RL circuit) والحالة العابرة الثانية الناتجة عن عدم تشبّع القلب الحديدي للمحول"، فبعد إنتهاء هذه الحالة العابرة تستقر قيمة التيار مما يُتيح قياس قيمة المقاومة.
- ✓ المحافظة على ثبات قيمة تيار الفحص قدر الإمكان طوال فترة الفحص وذلك بإستخدام مصدر تيار ثابت مُتحكم به.
- ✓ رفع قيمة تيار الفحص للوصول إلى تشبّع القلب الحديدي بشكل أسرع مع مراعاة عدم زيادته عن قيمة مُعيّنة حتى لا يؤدي لإرتفاع درجة حرارة الملفات مما يؤثر على قيمة المقاومة المُقاسة.
- ✓ بالإضافة إلى أساليب أخرى سيتم التطرق لها في نهاية الفصل مثل إضافة مقاومة خارجية ($R_{External}$) لدائرة الفحص وذلك لرفع مقدار المقاومة الكُلية وحفض مقدار المُعامل الزمني ($t = L/R$) مما يؤدي للوصول لحالة الإستقرار بشكل أسرع، أو زيادة عدد اللغات بمساعدة ملفات الفولتية المرتفعة (HV assist) أو ما يُسمى بطريقة ال (Dual winding)، وغيرها من الطُرق كزيادة فولتية الفحص المُطبّقة على الملفات مما يزيد القوة الدافعة المغناطيسية و يؤدي للوصول إلى تشبّع القلب الحديدي للمحول بشكل أسرع.

الشكل (3-7) يوضح سلوك التيار و الفولتية والمقاومة مع الزمن أثناء الفحص.



الشكل رقم (3-7)



فائدة عملية: عادةً عند فحص ملفات المحول الموصولة بطريقة النجمة (Y - Star) فإننا نقوم بتسجيل قيمة المقاومة بعد (30s - 10s) ثانية وهو الزمن اللازم لثبات قيمة تيار الفحص، أما في حالة فحص ملفات المحول الموصولة بطريقة المثلث (Delta - Δ) فإن الزمن اللازم لثبات قيمة تيار الفحص والوصول إلى حالة التشبع المغناطيسي للقلب الحديدي قد يستغرق أكثر من ذلك حيث قد يصل إلى (30min - 60min) دقيقة وهذه القيم تختلف تبعاً لقدرة المحول (Rating) وتوصيلة الملفات (Winding configuration) وقيمة التيار المحقون (Test current) كما ورد في [B. Hembroff, M Ohlen, P. Werelius, A Guide to Transformer Winding Resistance Measurements]

• كيف يدل هذا الفحص على وجود قطع كلي أو جزئي في الملفات:

كما هو معلوم أن قيمة المقاومة تعتمد على طول الموصل ومساحة مقطعه العرضي بالإضافة إلى مقاومة المادة الموصلة وفقاً للقانون التالي:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad (3.8)$$

حيث:

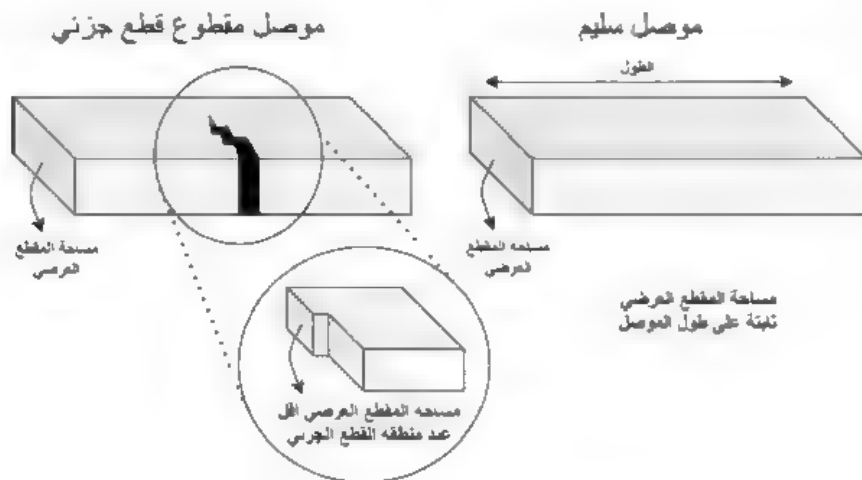
R : مقاومة الموصل (ملفات المحول).

ρ : المقاومة (Resistivity).

l : طول الموصل.

A : مساحة المقطع العرضي للموصل.

وفي حال حدوث قطع جزئي (Crack) مثلاً للمادة الموصلة - ملفات المحول - فإن مساحة المقطع العرضي لهذا الموصل تتغير - تقل - مما يعني زيادة في قيمة المقاومة وفقاً للقانون (3.8) السابق وكما هو موضح بالشكل (3-8)، وبهذا الإرتفاع في قيمة المقاومة يمكن معرفة وجود هذا النوع من الأعطال بملفات المحول.



الشكل رقم (3-8)

وهذا الإرتفاع بالمقاومة في منطقة القطع الجُرئي (Crack) سيؤدي إلى إرتفاع درجة حرارة هذا الموصل متناً بدوره غازات إحماء المعدن سابقة الذكر كما هو موضح في الشكل (3-9)، لذلك تُعد هذه الغازات عند ظهورها مُجتمعة في تحليل الغازات الذائبة في زيت المحول (DGA) إلى جانب إرتفاع درجة حرارة المحول إحدى دلائل وجود هذا النوع من الأعطال في المحول.



ملفات محول مقطوعة قطعاً جزئياً

الشكل رقم (3-9)

أما في حالة وجود قطع كلي للملفات (Open circuit) فإنه من المتوقع عدم مرور تيار فحص من الأساس.

الشكل (3-10) يُبين ملفات فولتية مرتفعة (HV winding) معطوبة الواردة في [NCLAS GRÖNSTRÖM, Optimal Demagnetization of Transformer After Winding Resistance Measurements].

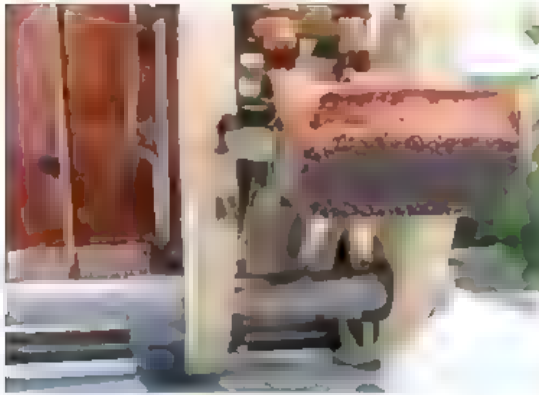


الشكل رقم (3-10)

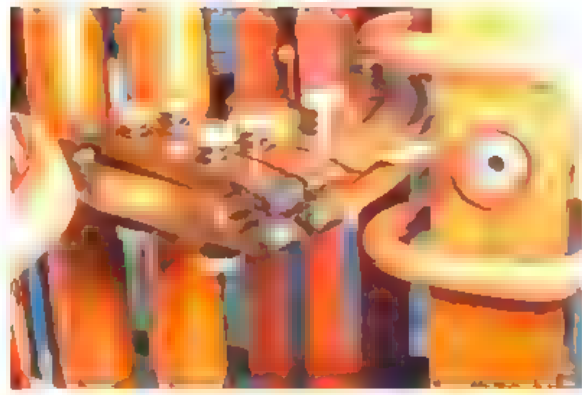
بالإضافة إلى ما سبق ههناك أجزاء أخرى غير الملعقات يُمكن لهذا الفحص الكشف عن الأعطال بها مثل نقاط إلتقاء موصلات عوازل الإختراق بالملفات، ونقاط إلتقاء الملفات بمُغيّر الخطوة كما هو موضح في الشكل (3-1)، فعند تعرّض هذه النقاط للإرتخاء (Loose) فإن مساحة المقطع العرضي الكُلية لمسار التيار تقلّ مُحدثه مقاومة مرتفعة لهذه النقاط وما ينتج عنها من حرارة وفقاً للشرح السابق، بالإضافة إلى حدوث تفريغات في هذه الوصلة المرتخية مما يؤدي لإحماة إضافي.

أما فيما يخص مُغيّر الخطوة (Tap-Changer) فإن الغازات الذائبة في الزيت الخاص به والناجمة عن عمليات التبديل لهذا المُغيّر قد تتسبب في تأكسد أسطح ملامساته أو تراكم الكربون عليها خاصة للخطوات (Taps) الأقل إستخداماً، وهذا بدوره يؤثر على قيمة المقاومة المُقاسة للملفات. كذلك يُمكن لتآكل ملامسات مُغيّر الخطوة خاصة في المحولات القديمة أو ذات التحميل المُرتفع التأثير على قيمة فحص مقاومة الملفات.

الشكل (3-11) (أ) يبين ملامس معطوب لمُحدد خطوة (Tap Selector)، والشكل (3-11) (ب) يبين آثار التقادم على ملامس مفتاح تحويل (Diverter Switch) خاص بمُغيّر خطوة (Tap-Changer) من نوع (OLTC) الواردة في [Raka Levi, Budo Milovic, OLTC Dynamic Testing].



- ب -



- أ -

الشكل رقم (3-11)

4. أمور لا بُدّ من مراعاتها قبل البدء بالفحص

4.1 إستقرار درجة حرارة المحول

كما هو معلوم أن قيمة المقاومة من القيم التي تتأثر بالحرارة بشكل كبير لذلك وللحصول على قيمة مقاومة ملفات حقيقية وللحد من تأثير درجة الحرارة على قيمة هذه المقاومة يجب التأكد من إستقرار درجة حرارة زيت وملفات المحول قبل القيام بالفحص، خاصة وأن هذا الفحص يهدف لقياس مقاومة ملفات المحول وهو بارد أو كما يُسمى أيضاً بفحص (Cold Winding Resistance Measurements).

ويبقى السؤال المطروح "كيف يُمكن التأكد من أن المحول وصل إلى مرحلة إستقرار الحرارة قبل البدء بالفحص؟"

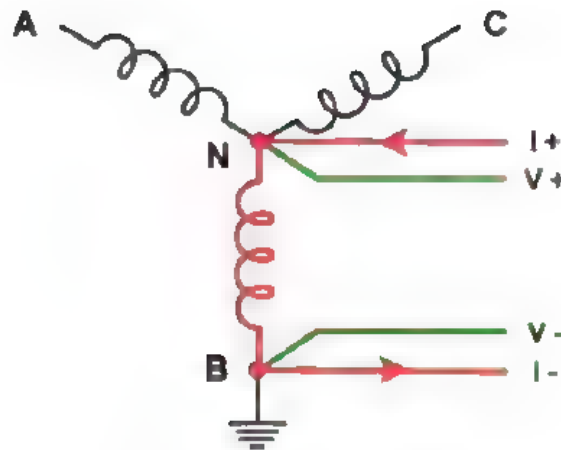
كثرت الآراء والشواهد التي تؤكد أن المحول مُستقر حرارياً، فبالرجوع إلى أشهر المعايير العالمية (Standards) يُمكن القول أن المحول مُستقر حرارياً فيما إذا تحققت واحدة من الشروط التالية:

- ✓ عندما يكون مقدار التغير في درجة حرارة الزيت العلوي (Top Oil Temperature) أقل من درجتين مئويتين لكل ساعة من الزمن حسب معايير (Standards) معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Std C57.12.90-2015].
- ✓ مرور قُرابة الثلاث ساعات على عزل المحول كهربائياً (Transformer De-energization)، وذلك للمحولات التي لا تحتوي على مضخة زيت أي ذات نظام التبريد الذي يعتمد على الدوران الطبيعي للزيت (Oil Natural - ON)، حسب معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Std C57.12.90-2015].
- ✓ مرور قُرابة الساعة على عزل المحول كهربائياً (Transformer De-energization)، وذلك للمحولات التي تحتوي على مضخة زيت أي ذات نظام التبريد الذي يعتمد على الدوران القسري للزيت (Oil Forced - OF)، مع مراعاة إبقاء المضخة بالعمل بعد عزل المحول كهربائياً إلى وقت بداية الفحص حسب معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Std C57.12.90-2015].
- ✓ عندما يكون مُتوسط درجة حرارة الزيت العلوي (Top Oil Temperature) والسفلي (Bottom Oil Temperature) مساوٍ بشكل تقريبي لدرجة حرارة الملفات (Winding Temperature) حسب معايير اللجنة الكهروتقنية الدولية [IEC 60076-1 2011].
- ✓ عندما يكون الفرق في درجة الحرارة بين زيت المحول العلوي (Top Oil Temperature) والسفلي (Bottom Oil Temperature) لا يزيد عن (5°) درجات مئوية حسب معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Std C57.12.90-2015].

4.2 توصيلة الملفات

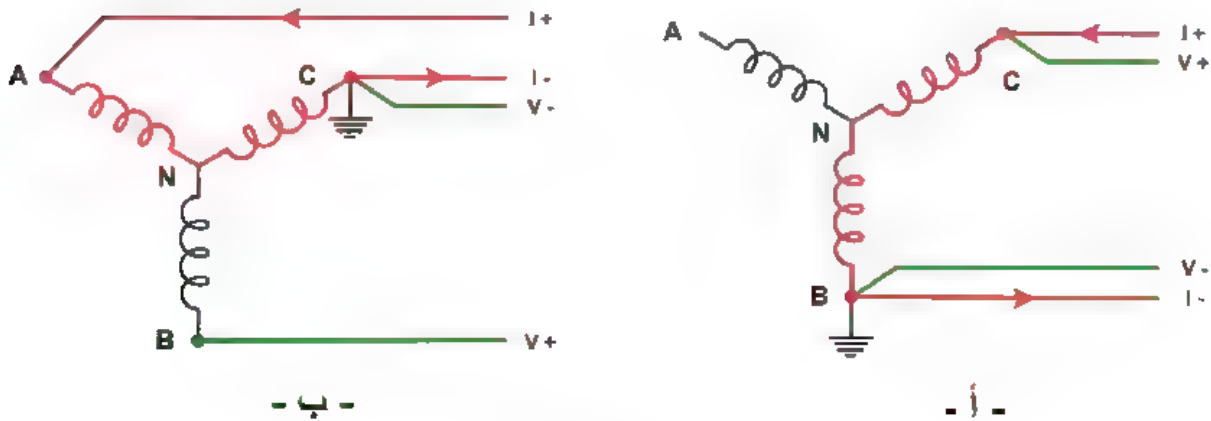
يجب مراعاة توصيلة ملفات المحول (Winding connection) المُراد فحصها قبل عمل توصيلة الفحص كالتالي:

- إذا كانت ملفات المحول المُراد فحصها موصولة بطريقة النجمة (Star - Y) مع إمكانية الوصول إلى نقطة التعادل (Neutral)؛ يتم الفحص بين طرف الحط (Line) ونقطة التعادل (Neutral) وذلك بحقق تيار الفحص بملف واحد فقط كما هو موضح في الشكل (12-3).



الشكل رقم (3-12)

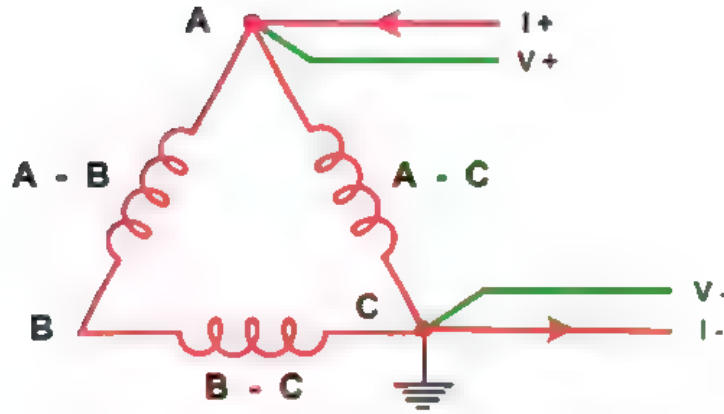
- إذا كانت ملفات المحول المُراد فحصها موصولة بطريقة النجمة (Star - Y) مع عدم إمكانية الوصول إلى نقطة التعادل (Neutral)؛ أي أن ملفات المحول موصولة بطريقة النجمة داخلياً ونقطة التعادل غير ظاهرة يُمكن قياس قيمة المقاومة (C-N) مثلاً بإجراء الفحص بطريقتين موضحتين في الشكل (3-13).



الشكل رقم (3-13)

في الطريقة الموضحة بالشكل [(3-13) (أ)] يتم حقن التيار الثالث عبر الأطراف (C-B) أي خلال ملعين وقياس قيمة الهبوط بالفولتية على الأطراف (C-B) وحساب المقاومة ثم يتم قسمتها على (2) للحصول على قيمة المقاومة (C-N) فقط، أما في الطريقة الموضحة بالشكل [(3-13) (ب)] فإنه يتم حقن التيار الثالث عبر الأطراف (A-C) أي خلال ملعين وقياس قيمة الهبوط بالفولتية على الأطراف (C-B) والتي تساوي ضمناً الهبوط في الفولتية على الأطراف (C-N) لأنه هو فقط الملف المشحون كما هو مُبين في الشكل السابق ومن ثم يتم حساب المقاومة (C-N).

- إذا كانت ملفات المحول المُراد فحصها موصولة بطريقة المثلث (Delta - Δ)؛ يجب إجراء الفحص بين أطراف الحط (Line)، حيث أن المقاومة المُقاسة لا تُعبّر عن قيمة مقاومة الملفات المفحوصة فقط وذلك لتأثير مقاومة الملفين الآخرين على قيمة المقاومة المُقاسة كما هو مُبين بالشكل (3-14) التالي.



الشكل رقم (3-14)

كما هو مُبين في الشكل السابق فإنه يُراد قياس مقاومة الملف (A-C)، ولكن عند قياس المقاومة باستخدام هذه التوصيلة فإن قيمة مقاومة الملفين (A-B و B-C) اللذان على التوازي مع الملف المُراد قياس مقاومته (A-C) يؤثران على قيمة هذه المقاومة لأن تيار الفحص سيُمر بهما، لذلك يلجأ إلى معرفة مقاومة الملفات حسابياً باستخدام المعادلة التالية:

$$\text{Resistance per winding (A - C)} = 1.5 \times \text{Measured Resistance value} \quad (3.9)$$

ملحوظة (3-2): يُمكن الإعتماد على الطريقة السابقة في حال كانت قيمة مقاومة الأطوار الثلاثة للملفات الموصولة على شكل مثلث (Delta - Δ) متساوية كما هو الحال في أغلب المحولات، أما إذا كانت قيم المقاومة مختلفة فإنه يلجأ لطرق أخرى أكثر تعقيداً لمعرفة قيمة المقاومة لكل ملف على حدا.



- إذا كانت المحول المُراد فحصه محول تلقائي (Autotransformer) أي أن الملفات موصولة بطريقة النجمة (Star - Y)؛ يقوم بالفحص بين أطراف ملفات الفولتية المرتفعة (HV) وأطراف ملفات الفولتية المتوسطة (IV) ومن ثم بين أطراف ملفات المتوسطة (IV) وأطراف ملفات الفولتية المنخفضة (LV).

ملحوظة (3-3): في حال كانت الملفات المفحوصة تتكون من عدة ملفات فرعية أي في حالة وجود مُغيّر خطوة (Tap Changer)، فإنه يجب عمل الفحص على جميع الخطوات (Taps).



4.3 تسجيل درجة الحرارة

يجب تسجيل درجة حرارة الجو المحيط (Ambient Temperature) وكذلك درجة حرارة الملفات (Winding Temperature) قبل البدء بالفحص وذلك بأخذ قيمة حرارة الملفات عبر مؤشر درجة

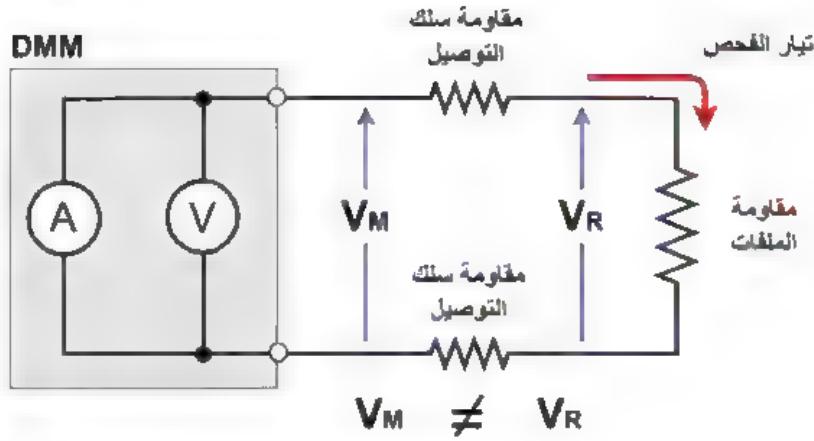
الحرارة الخاص بالملفات (Winding Temperature Gauge) والمُثبت على جانب المحول في لوحة التحكم الخاصة بالمحول، وفي حال تُعذر أخذها فإنه يتم إعتداد متوسط درجة حرارة الزيت الخاص بالمحول عبر مؤشرات درجة حرارة الزيت كُكل أو العلوي و السفلي إن وجدت (Top/Bottom Oil Temperature Gauges)، كما وتُجدر الإشارة إلى طريقة غير دقيقة لأخذ درجة الحرارة في حال وجود مشكلة في مؤشر درجة الحرارة وذلك عن طريق وضع مقياس درجة حرارة (Thermometer) على جذران خزان المحول بشكل مُلاصق للحصول على درجة حرارة الملفات بشكل تقريبي في حال كان المحول مستقر حرارياً كما ذكر في معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات - [IEEE Std C57.152-2013].

5. طرق الفحص

هناك عدة طرق يُمكن من خلالها إجراء هذا الفحص بحيث يتم إعتداد الطريقة وفقاً للتجهيزات الموجودة بالموقع وتوافرية المُعدات اللازمة لهذا الفحص بالإضافة إلى مقدار المقاومة المُراد قياسها بداية من الطريقة المباشرة أو كما تُسمى (Voltmeter-Ammeter (Kelvin) Method)، حيث تُعد من أبسط الطرق وأقدمها لإجراء هذا الفحص إلى جانب الطرق التي تعتمد على القباطر (Bridges) مثل قنطرة كيلفين/ثومبسون (Kelvin/Thompson Bridge) التي يتم إستخدامها للمقاومات الأقل من (1Ω) أوم، أو قنطرة وتستون (Wheatstone Bridge) للمقاومات الأكبر من (1Ω) أوم. أما حالياً فإن أجهزة الفحص الإلكترونية الرقمية (Digital Electronic Milli-Ohmmeters) هي الأكثر شيوعاً لقياس قيمة المقاومات الصغيرة كمقاومة ملفات المحول والتي سيتم التطرق إلى كيفية إستخدامها في المُلاحقات.

5.1 الطريقة المباشرة – Voltmeter-Ammeter Method

هناك عدة طرق لقياس المقاومة بشكل مباشر، فمنها ما يعتمد على طريقة زوج الأسلاك للقياس (Two Wires Method) كما هو الحال في أجهزة القياس الرقمية (Digital MultiMeter - DMM) واسعة الإنتشار، ففي هذه الأجهزة يتم حقن تيار ثابت (DC Current) وقياس الهبوط في الفولتية على أطراف المقاومة المُراد فحصها عبر نفس الزوج من الأسلاك (Test Leads) كما هو مبين في الشكل (3-15)، و بطلاً لمرور تيار الفحص المُرتفع في هذا الزوج من أسلاك القياس فإن قيمة الهبوط في الفولتية المُقاسة (Measured Drop Voltage - V_M) لا تعكس مقدار الهبوط بالفولتية على المقاومة (Voltage Across Resistance - V_R) المُراد فحصها فقط وإنما تحوي كذلك الهبوط بالفولتية الناتج عن مرور التيار بزوج أسلاك الفحص (Leads Drop Voltage - V_{Leads}) كما هو موضح بالشكل (3-15)، حيث تُقدّر قيمة مقاومة أسلاك الفحص عادة (100mΩ - 1000mΩ) ملي أوم وهي قيمة مُرتفعة ومن شأنها التأثير على قيمة المقاومة المُراد فحصها خاصة إذا كانت هذه المقاومة ذات قيمة قليلة، حيث لو أننا قمنا بقياس مقاومة مقدارها (1Ω) بإستخدام هذه الطريقة (Two wires method) وكانت قيمة مقاومة زوج أسلاك التوصيل (Test leads) قرابة (100mΩ) فإن مقدار الخطأ في القياس (Measuring Error) سيساوي قرابة (10%) بالمئة وهي قيمة مُرتفعة.



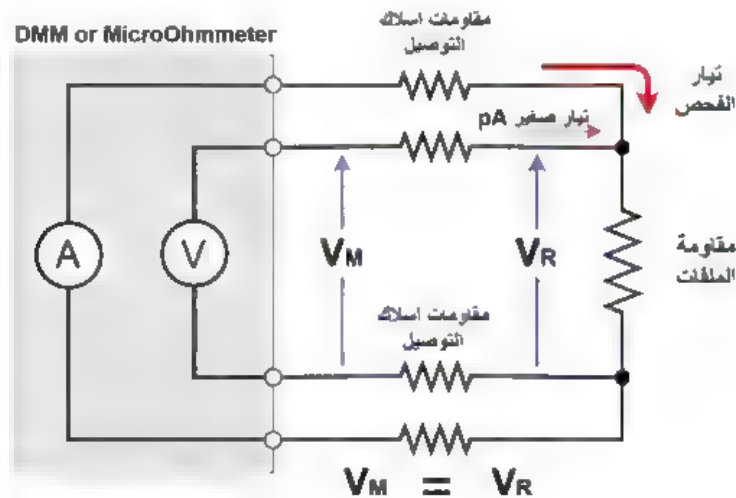
الشكل رقم (3-15)

حيث:

$$R_{Measured} = \frac{V_{Measured}}{I} = R_{Winding} + R_{Leads} \quad (3.10)$$

يُمكن الملاحظة من المعادلة (3.10) السابقة أن قيمة المقاومة المُقاسة تساوي قيمة مقاومة الملفات مضافاً إليها قيمة مقاومة أسلاك التوصيل، مما يعني قيمة مقاومة ملفات غير دقيقة خاصة إذا كانت قيمة مقاومة هذا الملفات قليلة.

لذلك للمقاومات الصغيرة كما هو الحال في ملفات المحول يتم اللجوء لطريقة قياس أخرى تستخدم زوجين من أسلاك التوصيل عوضاً عن زوج واحد (Four Wires Method) أو كما تُسمى (Kelvin Method) حسب معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Std C57.152-2013]، حيث يتم حقن المقاومة المُراد فحصها بتيار ثابت (DC Current) عبر زوج من أسلاك التوصيل (Current Test) وقياس الهبوط في الفولتية على أطراف المقاومة المُراد فحصها عبر زوج آخر من الأسلاك (Voltage Test Leads)، ونظراً للتيار القليل المار في زوج الأسلاك المخصص لقياس الفولتية والذي عادة ما يكون بالـ (picoAmpere - pA) بيكو أمبير فإن الهبوط بالفولتية الناتج عن مروره بمقاومة أسلاك التوصيل يُصبح ذو قيمة مهملة ولا يؤثر على قيمة المقاومة المُقاسة كما هو موضح في الشكل (3-16).

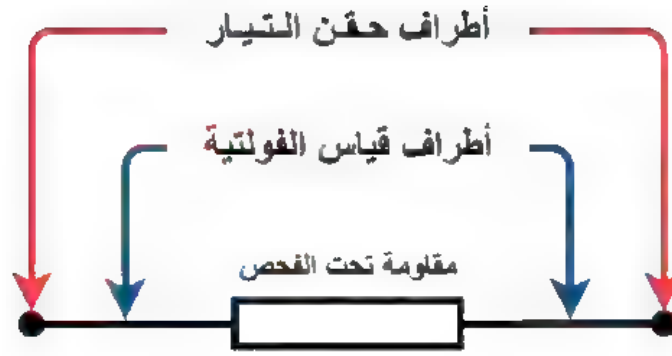


الشكل رقم (3-16)

ومنه يُمكن إعتقاد هذه الطريقة (Four Wires Method) لقياس مقاومة ملفات المحول ذات القيمة القليلة وذلك ليدقتها المرتفعة مقارنة مع نظيرتها ذات الروح من الأسلاك (Two Wires Method) سابقة الذكر.

• المُعدات المستخدمة بالفحص

- مصدر كهربائي (Power Supply): مصدر تيار ثابت مُتحكم به (Regulated Constant Current DC power supply) ذو مستوى فولتية وتيار مناسب، ويُمكن أيضاً إستخدام بطارية (12V) فولت لإجراء هذا الفحص. كما يجب التأكد من أن هذا المصدر المُتحكم به مُعاير (Calibrated).
- أسلاك توصيل (Test Wires): يجب مراعاة الأمور التالية عند إختيار وتركيب أسلاك التوصيل الخاصة بهذا الفحص:
 - يجب إستخدام أقصر ما أمكن من أسلاك التوصيل وذلك لتجنب تأثير المجالات من الخطوط القريبة (OHL) المشحونة، بالإضافة لتقليل تأثير مقاومة الأسلاك على المقاومة النهائية المُقاسة خاصة زوج الأسلاك المخصص لقياس الفولتية الثابتة (Voltage Test Leads). وفي حال كانت الأسلاك طويلة ولا يُمكن جعلها أقصر، يجب وضع الرائد منها بطريقة طويلة جنباً إلى جنب وعدم لفها على شكل ملف (Coil) مما يُضيف محاثّة غير مرغوب بها لدائرة الفحص.
 - مراعاة إختيار مساحة مقطع الأسلاك فيما يتناسب مع قيمة تيار الفحص.
 - تجنب وصل أسلاك الفحص بالملفات المُراد قياس مقاومتها عبر موصلات إضافية أو قضبان (Busbars) بل يجب توصيلها بالملفات مباشرة عبر أطراف الموصلات الموجودة أعلى عازل الإختراق (Bushing).
 - يجب توصيل الأسلاك بالرأسية الخاصة بها أو ما يُسمى بالمشابك أو الملاقط (Clamp or lugs) فيما إذا كانت (Spade-lug, Clip, Kelvin Clamp,... etc) عن طريق اللحام لتجنب حدوث قطع أثناء الفحص لما لذلك من مخاطر كبيرة سيتم شرحها.
 - التأكد من نظافة موصل عوازل الإختراق (Bushings) قبل تركيب مشبك أو ملقط أسلاك التوصيل عليه (Test Leads Clamp) حتى لا تؤثر على نتيجة الفحص.
 - التأكد من التثبيت الجيد لرأسية/مشبك أسلاك التوصيل على موصلات عوازل الإختراق (Bushings) لتجنب سقوطها وفتح الدائرة أثناء الفحص وذلك يكون عبر وضع براغي على رأسية أسلاك التوصيل خاصة ذات النوع (Spade or Fork lug) أو عبر إستخدام مشبك إضافي على شكل حرف (C) أو كما يُسمى (C Clamp) للتثبيت الحيد لأسلاك التوصيل بأطراف الملفات كالموصلات الموجودة على أعلى عازل الإختراق (Bushing).
 - التأكد من أن تكون أطراف قياس الفولتية محصورة بين أطراف حقن التيار أي أنها أقرب للمقاومة المُراد فحصها وهي ملفات المحول في حالتنا هذه كما هو موضح في الشكل (17-3).



الشكل رقم (3-17)

كما ويُمكن أن يكون زوجي أسلاك التوصيل الخاصة بحقن التيار وقياس الفولتية على نفس المشبك أو الرأسية كما هو موضح بالشكل (3-18)، مع مراعاة النقطة السابقة بحيث تكون أسلاك قياس الفولتية أقرب للملفات، كما ويُسمح بأن تكون أسلاك قياس الفولتية متقابلة مع أسلاك حقن التيار أي تفصلهما زاوية مقدارها (180°) درجة كما هو الحال بالمشابك (Clamps) من النوع (C) والنوع (Kelvin).



الشكل رقم (3-18)

- جهاز قياس تيار ثابت (DC) رقمي (Digital Ammeter): ذو دقة عالية (high Accuracy) وكذلك ذو تدرج (Scale) مناسب لقيَم الفحص، كما يجب التأكد من أنه مُعاير (Calibrated)
- جهاز قياس فولتية ثابتة (DC) رقمي (Digital Voltmeter): ذو دقة عالية (high Accuracy) وكذلك ذو تدرج (Scale) مناسب لقيَم الفحص، كما يجب التأكد من أنه مُعاير (Calibrated).

- **مفاتيح تحكم (Switches):** مفتاح سكينى رباعي الأقطاب معزول (4 Poles Knife Switch) ومفتاح سكينى ثنائى الأقطاب معزول (2 Poles Knife Switch) مناسبين، بالإضافة إلى التأكد أنها لا تحتوي على مُصهر (فيوز).
 - **ساعة إيقاف (Stopwatch):** لقياس الزمن اللازم للوصول لحالة الإستقرار بعد البدء بالفحص.
 - **مقاومة غير حثية إضافية (Non-inductive External Resistor):** ذات قيمة كبيرة مقارنة بقيمة مقاومة ملفات المحول وذلك للمساعدة في الوصول لحالة إستقرار التيار في وقت أقصر تبعاً لما تم شرحه مُسبقاً حول المُعامل الرسمى (t) و الذي يعتمد على قيمة المحاثة والمقاومة (L/R)، حيث بزيادة المقاومة يقل هذا المُعامل الزمني مما يؤدي للوصول إلى حالة الإستقرار بزمن أقل، فمثلاً لو كانت قيمة مقاومة الملفات (0.5Ω) أوم وتم إضافة مقاومة خارجية لدائرة الفحص على التوالي مع مقاومة الملفات مقدارها (1Ω)، عندها سوف يُقلّ المُعامل الرسمى بمقدار الثلث و يقل الزمن الكلي للوصول إلى حالة الإستقرار قُرابة الخمس أثلث ($5/3$) على إعتبار زمن الإستقرار عند ($5t$) للدوائر (Series R-L).
- كما ويتم إستخدام هذه المقاومة للتحكم والحد من قيمة تيار الفحص (**Current Limiting**) في حال كانت قيمة المقاومة المُقاسة قليلة جداً وكان مصدر الفولتية بطارية أو أي مصدر فولتية آخر غير مُتحكم به، حيث أنه عند تطبيق فولتية ثابتة (**DC Voltage**) مقدارها ($12V$) فولت غير مُتحكم بها (بإستخدام بطارية مثلاً) على ملفات محول مقاومتها ($20m\Omega$) ملي أوم فإن التيار المُتوقع قُرابة ($600A$) وهو تيار كبير جداً وقد يلحق الضرر بالملفات والمصدر الكهربائي، وللحد من قيمة هذا التيار يتم إضافة هذه المقاومة الخارجية لدائرة الفحص والتي تعتمد قيمتها على قيمة تيار الفحص المُراد، ففي المثال السابق كانت فولتية الفحص ($12V$) فولت و مقاومة الملفات ($20m\Omega$) وإذا أردنا تيار فحص مقداره ($1A$) أمبير فيجب إضافة مقاومة خارجية لدائرة الفحص قُرابة (12Ω) أوم مع مراعاة قُدرة هذه المقاومة على تبديد الحرارة (**Resistor Wattage**). ويجب مراعاة الحاجة إلى فولتية ثابتة (**DC voltage**) أكبر من ($12V$) فولت في بعض الأحيان وذلك لتعويض هبوط الفولتية الناتج من المقاومة المُصافة لدائرة الفحص. أما في حال إستخدام مصدر كهربائي ذو تيار ثابت مُتحكم به (**Constant DC Current Source**) فإنه لا يلزم إضافة مقاومة خارجية لدائرة الفحص.

● طرق تفريغ الطاقة المُخزنة بالملفات بعد إنتهاء الفحص.

عند إجراء هذه الفحص ونتيجة لحقن محاثة ملفات المحول تيار فحص ثابت (**DC current**)، تنشأ طاقة مُخزنة في هذه المحاثة تتناسب طردياً مع قيمة هذه المحاثة وقيمة مُربع تيار الفحص وفقاً للمعادلة التالية:

$$\text{Stored Energy} = \frac{1}{2} I^2 L \quad (3.11)$$

وكما هو معلوم أن الطاقة المحتزنة في المحاثية (Inductor) يتم تفريغها عند فتح الدائرة الخاصة به (Open circuit) على المقيض من المكثفات (Capacitors) والتي تحتاج لدائرة قِصر حتى يتم التفريغ (Short circuit). وللتخلص من هذه الطاقة المُحتزنة بعد الإنتهاء من الفحص يجب القيام بواحدة من الطُرق التالية وذلك عن طريق دمجها بدائرة الفحص كالآتي:

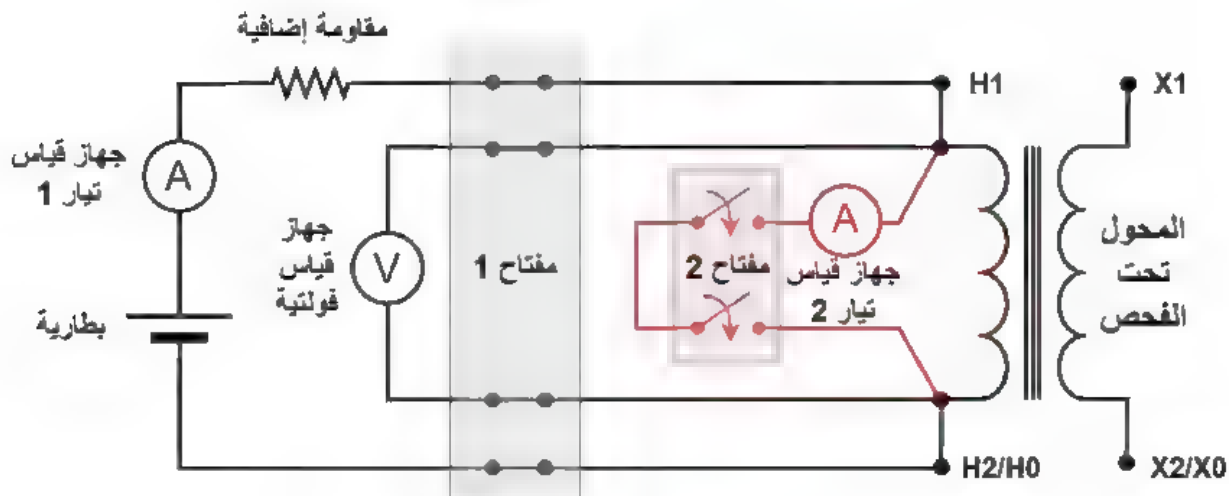
○ طريقة القِصر – Short Circuit Method

في هذه الطريقة يتم قِصر أطراف الملفات (Short circuit) بعد الإنتهاء من الفحص وقبل فتح دائرة الفحص الرئيسية كما هو مبين في الشكل (3-19) حيث أن الأجزاء باللون الأحمر تُشير لدائرة التفريغ، ويحتاج تيار التفريغ أو كما يُمكن تسميتها بالطاقة المحتزنة للوصول إلى مستوى قليل جداً قرابة الـ (5t) و هو تقريباً نفس الزمن اللازم لإستقرار التيار عند إجراء الفحص وذلك نظراً لثبات قيمة المُعامل الزمني (t) للحالتين كما هو مُبين في المعادلة التالية. وعادةً ما يكون زمن التفريغ من (30s) ثانية إلى قرابة الدقيقتين (2min).

$$t = \frac{L}{R} = \frac{L}{R_w} \quad (3.12)$$

حيث؛

t : المُعامل الزمني لدائرة الـ (Series R-L).
L : قيمة المحاثية. (Henry)
R_w : قيمة مقاومة الملفات. (Ω)



الشكل رقم (3-19)

كما هو مُبين في الشكل (3-19) بعد إجراء فحص مقاومة الملفات (WRM) وتسجيل قيمة مقاومة الملفات نقوم بإغلاق المفتاح رقم (2) ومن ثم نقوم بفتح المفتاح رقم (1) والانتظار حتى يصل التيار في وصلة القِصر إلى الصفر عبر جهاز قياس التيار رقم (2)، بعد ذلك يُمكن فتح المفتاح رقم (2) مع مراعاة عدم النظر مباشرة لشرارة القوس الكهربائي التي ستظهر لمدة قليلة من الزمن قرابة الثانية الواحدة، ويُفضّل إغلاق وفتح المفتاح رقم (2) أكثر من مرة للتأكد من التفريغ الكامل

الملفات، بعد ذلك يُمكن إزالة أسلاك التوصيل الخاصة بالفحص بحذر ونقلها للطور الآخر المُراد فحصه.

○ طريقة مقاومة التفريغ – Discharge Resistor Method

في هذه الطريقة يتم قصر أطراف الملفات (Short circuit) بعد الإنتهاء من الفحص وقبل فتح دائرة الفحص الرئيسية على عرار الطريقة السابقة ولكن بوجود مقاومة تفريغ (R_D) للتقليل من زمن التفريغ كما هو موضح في الشكل (20-3) حيث أن الأجزاء باللون الأحمر تُشير لدائرة التفريغ، فكما ذكر سابقاً أن قيمة المُعامل الزمني (t) تعتمد على قيمة المقاومة فبعد تعويض قيمة مقاومة التفريغ (R_D) في المعادلة (3.12) السابقة عوضاً عن المقاومة (R) ونظراً لأن مقاومة التفريغ أكبر من مقاومة الملفات فإن المعامل الزمني سيقَلّ ومعه تقلّ المدة اللازمة للتفريغ ووصول تيار التفريغ لقيمة قليلة جداً قرابة الصفر. ومما سبق يُمكن ملاحظة أنه كلما كانت هذه المقاومة أكبر كلما قلّ الزمن اللازم للتفريغ ولكن بالمقابل فإن القيمة الكبيرة لهذه المقاومة سوف تؤدي لظهور فولتية مرتفعة على أطرافها وفقاً للمعادلة التالية:

$$V_D = I_T \cdot R_D \quad (3.13)$$

حيث؛

V_D : أعلى مقدار فولتية سيظهر على أطراف مقاومة التفريغ.

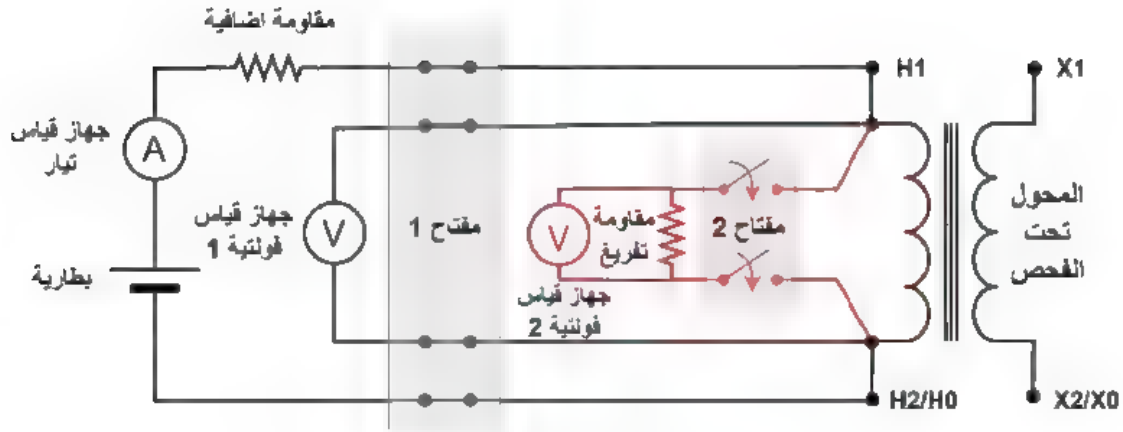
I_T : تيار الفحص.

R_D : مقاومة التفريغ.

لذلك ولتحديد قيمة هذه المقاومة (R_D) يُمكن تحديد قيمة الفولتية العظمى التي ستظهر على أطرافها ومنه يُمكن معرفة قيمة هذه المقاومة وفقاً للمعادلة (3.14) على فرض أن الفولتية العظمى المُراددة على أطراف مقاومة التفريغ (R_D) ولا يجب تجاوزها هي (50V) فولت كمثال.

$$R_D = \frac{50}{I_T} \quad (3.14)$$

وهذا بدوره يُفسر ظهور شرارة قوس كهربائي كبيرة عند فتح دائرة الفحص دون وجود دائرة تفريغ، حيث أنه عند فتح الدائرة كما وأنك أضفت مقاومة تفريغ (R_D) قيمتها لا نهائية (∞) ومن المعادلة (3.14) السابقة يُمكن ملاحظة تأثير مقاومة التفريغ اللانهائية على قيمة الفولتية على أطراف مقاومة التفريغ أو الأطراف المفتوحة في حالتنا هذه، حيث ستكون الفولتية بالكيلوفولت وهو سبب ظهور القوس الكهربائي سابق الذكر.

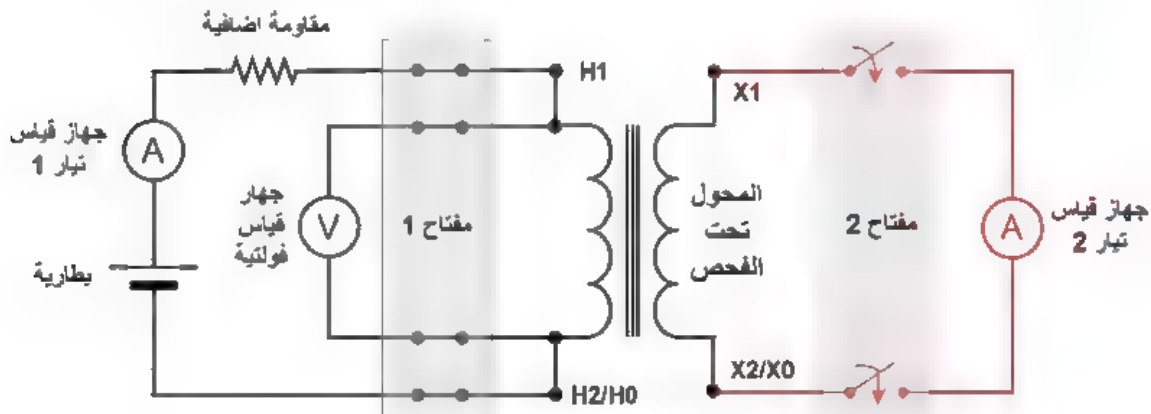


الشكل رقم (3-20)

كما هو مبين في الشكل (3-20) بعد إجراء فحص مقاومة الملفات (WRM) وتسجيل قيمة مقاومة الملفات نقوم بإغلاق المفتاح رقم (2) ومن ثم نقوم بفتح المفتاح رقم (1) والانتظار حتى تصل قيمة الفولتية على أطراف مقاومة التفريغ (R_D) إلى الصفر عبر مقياس الفولتية رقم (2)، بعد ذلك يُمكن فتح المفتاح رقم (2) مع مراعاة عدم النظر مباشرة لشرارة القوس الكهربائي التي ستظهر لمدة قليلة من الزمن قرابة الثانية الواحدة، ويُفضل إغلاق وفتح المفتاح رقم (2) أكثر من مرة للتأكد من التفريغ الكامل للملفات، بعد ذلك يُمكن إزالة أسلاك التوصيل الخاصة بالفحص ونقلها للطور الآخر المُراد فحصه.

○ طريقة التفريغ بواسطة الملفات الثانية على نفس الطور – Second Winding Method

في هذه الطريقة يتم قصر أطراف الملفات الأخرى على نفس الطور (أي التي لم يتم فحصها) بشكل مؤقت، فمثلاً لو قمنا بإجراء فحص مقاومة الملفات (WRM) على أطراف الفولتية المرتفعة (H1 و H2) يتم قصر أطراف الفولتية المنخفضة (X1 و X2) مع مراعاة أن تيار ملفات الفولتية المنخفضة سيكون أكبر تبعاً لنسبة التحويل الخاصة بالمحول والعكس بالعكس في حال فحص ملفات الفولتية المنخفضة والتفريغ على ملفات الفولتية المرتفعة.



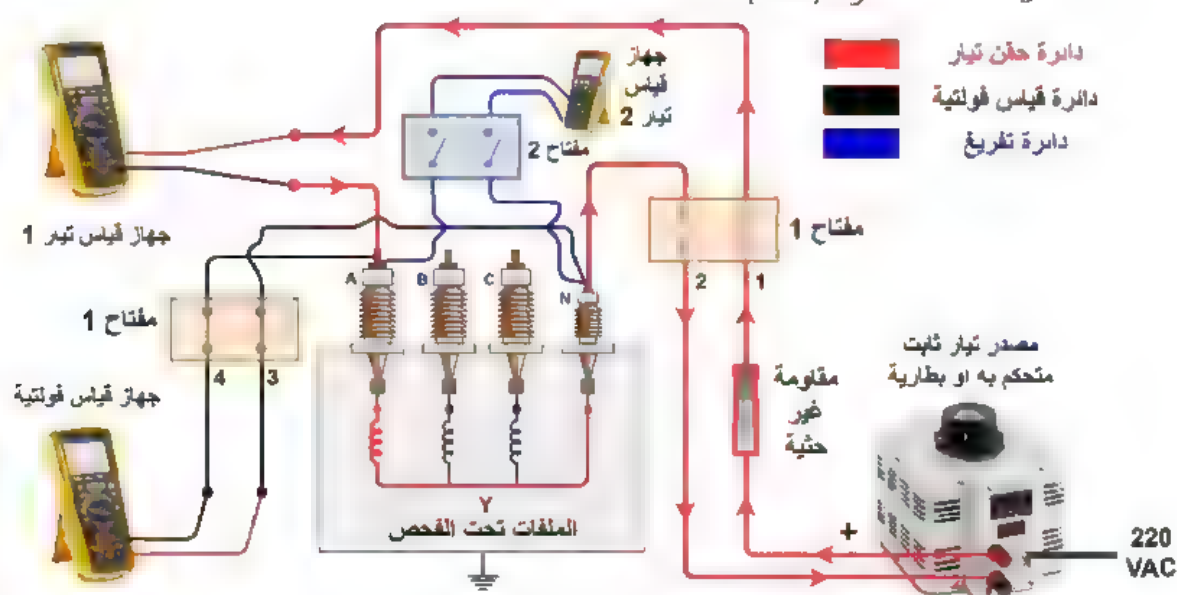
الشكل رقم (3-21)

الشكل (3-21) السابق يوضح التوصيلة الخاصة بفحص مقاومة الملفات المحول المُراد فحصه، مضافاً إليه طريقة التفريغ هذه والمشار إليها باللون الأحمر، بحيث تنتهي عملية التفريغ بعد وصول قيمة التيار للصفر عبر مقياس التيار رقم (2).

• توصيلة الفحص

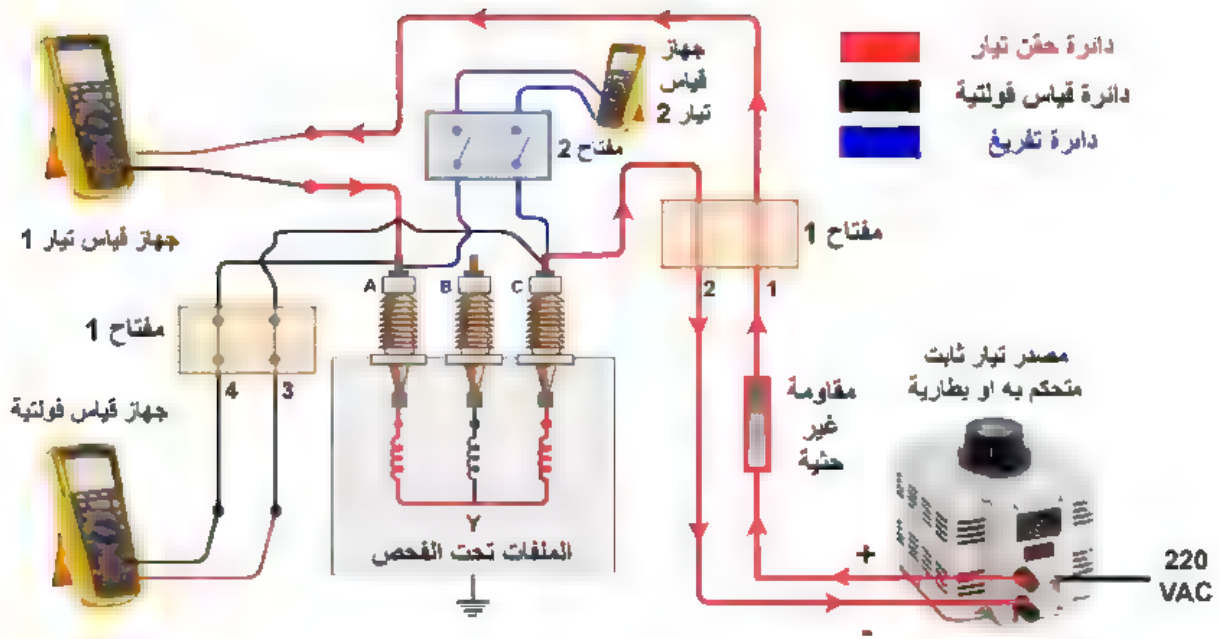
تعتمد توصيلة الفحص على التوصيل الداخلي لملفات المحول المُراد فحصه، وتتلخص توصيلات هذا الفحص للمحولات ثلاثية الطور ثنائية الملفات (Three phase two winding) بثلاث توصيلات رئيسية موضحة أدناه، بحيث يتم عمل هذه التوصيلات مع مراعاة أن يكون مصدر الطاقة آخر شيء يتم وصله بالدائرة لأسباب مُتعلقة بالسلامة العامة.

○ في حال كانت ملفات المحول المُراد فحصه موصولة على شكل نجمة (Star - Y) مع نقطة تعادل (Neutral Point) يُمكن الوصول إليها. يوضح الشكل (3-22) توصيلة الفحص لقياس مقاومة ملف المحول (A-N).



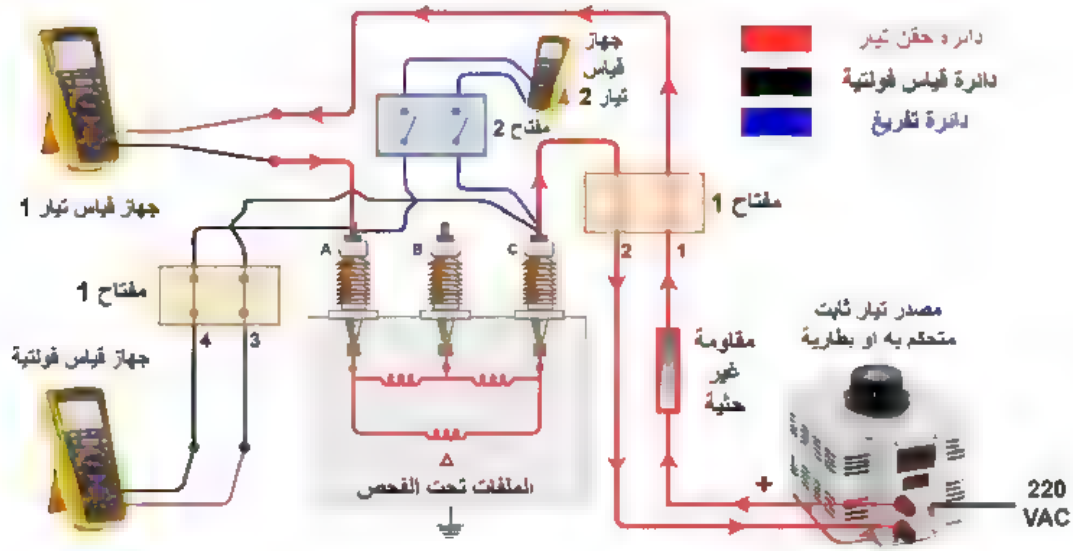
الشكل رقم (3-22)

○ في حال كانت ملفات المحول المُراد فحصه موصولة على شكل نجمة (Star - Y) مع نقطة تعادل (Neutral Point) لا يُمكن الوصول إليها (أي أنه موصول بطريقة النجمة (Star) داخلياً). يوضح الشكل (3-23) توصيلة الفحص لقياس مقاومة ملف المحول (A-N) أو (C-N)، وفي هذه التوصيلة يتم قسمة قيمة المقاومة المُقاسة (A-C) على العدد (2) للحصول على قيمة المقاومتين (A-N) و (C-N).



الشكل رقم (3-23)

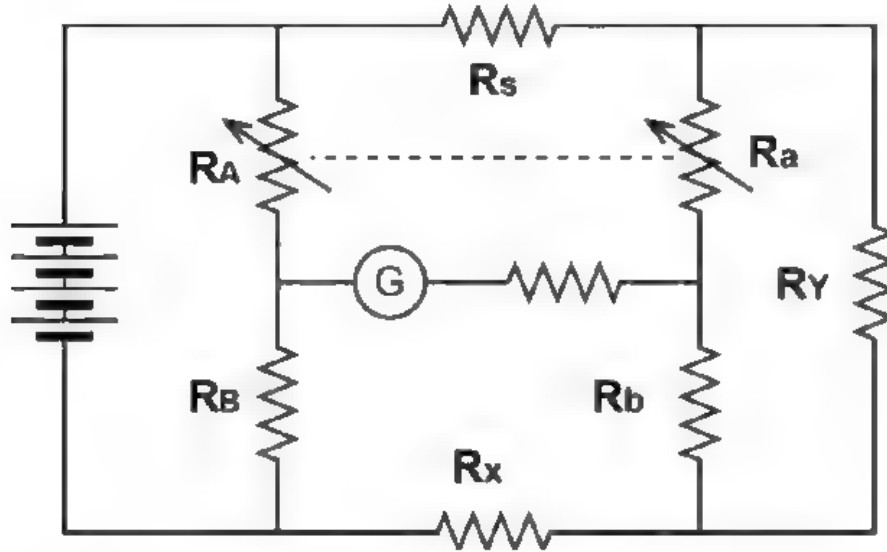
○ في حال كانت ملفات المحول المراد فحصه موصولة على شكل مثلث (Delta - Δ). يوضح الشكل (3-24) توصيلة الفحص لقياس مقاومة ملف المحول (AC)، وفي هذه التوصيلة يتم ضرب قيمة المقاومة المقاسة ($AC/(AB+BC)$) بـ (1.5) للحصول على قيمة مقاومة الملف (A-C) كما تم ذكره سابقاً.



الشكل رقم (3-24)

5.2 قنطرة كيلفين/ثومبسون - Kelvin/Thompson Bridge

يتم استخدام هذه القنطرة لقياس مقاومة ملفات المحول الأقل من (1Ω) أوم وتُعد أحد أشكال طريقة الزوجين من أسلاك التوصيل لقياس المقاومة أو كما تُسمى (Four Wires Method)، كما وتعتمد بعض أجهزة الفحص في آلية عملها على هذا النوع القباطر مثل جهاز الفحص (Transformer Ohmmeter) المُصنَّع بواسطة شركة (MEGGER) الرائدة في مجال صُنع أجهزة القياس. الشكل (3-25) يوضح التوصيلة الخاصة بهذه القنطرة.



الشكل، رقم (3-25)

$$R_x = R_s \left(\frac{R_B}{R_A} \right) \quad (3.15)$$

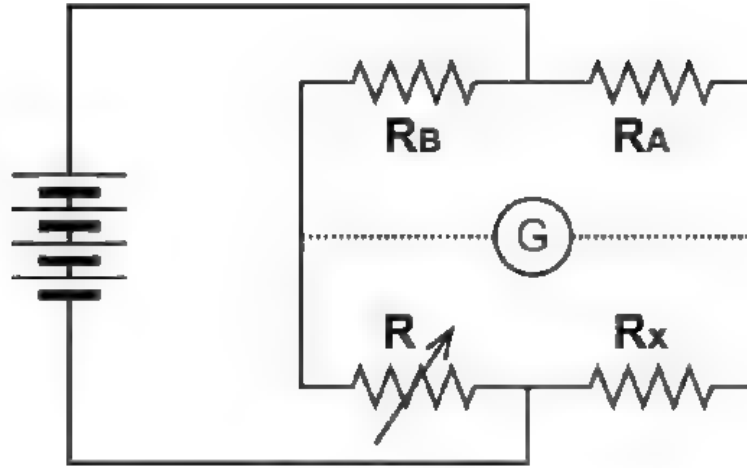
حيث؛

$$\{ R_B = R_b, R_A = R_a \}$$

وتُعبّر المقاومة (R_x) في الشكل السابق عن مقاومة ملفات المحول المراد معرفة قيمتها.

5.3 قنطرة ونستون - Wheatstone Bridge

يتم استخدام هذه القنطرة لقياس المقاومات ذات القيمة المساوية أو الأكبر من (1Ω) أوم وتُعد أحد أشكال طريقة زوج أسلاك التوصيل لقياس المقاومة أو كما تُسمى (Two Wires Method)، والشكل (3-26) يوضح التوصيلة الخاصة بهذه القنطرة.



الشكل رقم (3-26)

$$R_x = R \left(\frac{R_A}{R_B} \right) \quad (3.16)$$

وتُعبّر المقاومة (R_x) في الشكل السابق عن مقاومة ملفات المحول المراد معرفة قيمتها.

5.4 الفحص باستخدام جهاز الـ (Milli-ohmmeter)؛ حيث سيتم التوضيح لاحقاً خطوات

الفحص في الملحق رقم (3-2) في حال استخدام جهاز الفحص (Transformer Ohmmeter AVTM830280) المُصنَّع بواسطة شركة (MEGGER)، و الملحق (3-3) في حال استخدام جهاز الفحص (Transformer Ohmmeter MT0210) المُصنَّع بواسطة شركة (MEGGER)، و الملحق (3-4) في حال استخدام جهاز الفحص (TESTRANO 600) المُصنَّع بواسطة شركة (OMICRON)

تحذير: لا تحقن التيار في الملفات عبر مُصهرات (فيوزات) وإن وجدت يجب إلغاؤها بعمل وصلة قِصر عليها (Jumper)، وذلك لأنها تزيد من احتمالية حدوث فتح (Open circuit) في دائرة الفحص وهو من الأمور الخطرة خاصة إذا حدث ذلك أثناء مرور التيار الثابت (DC).



تحذير: عند القيام بهذه الطريقة يجب توخي الحذر من فتح الدائرة أثناء حقن التيار الثابت (DC current) قصداً أو دون قصد كسقوط أسلاك التوصيل الخاصة بحقن التيار عن أطراف المحول والذي من شأنه عمل صدمة حثية (Induction Kick) للمُعدات والأشخاص، وكذلك يجب تجنب الفصل المفاجئ للتيار مما يؤدي إلى إرتفاع الفولتية وإلحاق الضرر بالمصدر الكهربائي أو المقاومة الموصولة على التوالي، كما ويُصبح بقصر الملفات (Short circuit) قبل فصل المصدر الكهربائي كما هو موضح في الأشكال (3-22, 23 & 24)، أو عبر استخدام (Surge or Transient Protector) مناسب. كما ويُصبح بفصل أطراف قياس الفولتية قبل البدء بحقن التيار وقبل فصله لتجنب أي ضرر قد يُصيب جهاز الفحص (Voltmeter). (مهم جداً)



6. خطوات الفحص

الخطوات التالية تم وضعها بالإعتماد على المعايير الخاصة بمعهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE C57.152-2013] بالإضافة إلى الخبرة العملية في إجراء هذا الفحص في الموقع:

6.1 عزل المحول كهربائياً (Transformer De-energization) مع مراعاة تطبيق نظام (إقفال مصادر الطاقة ووضع لافتات عليها) أو ما يُسمى بنظام التقافل (Lock-out Tag-out LOTO).

6.2 عزل نظام مكافحة الحريق بالماء (أو كما يُسمى نظام تبريد خزان المحول ومبع إنتشار الحريق) الخاص بالمحول المُراد فحصه خشية عمل النظام بشكل حاطئ أثناء إجراء الفحص مما قد يؤدي لمخاطر القوس الكهربائي وما ينطوي عليه من مخاطر على الأشخاص أو المحول خاصة أثناء تطبيق الفولتية على المحول أو قد يؤدي الماء لتلف جهاز الفحص نفسه.

6.3 تطبيق كافة إجراءات السلامة الخاصة بإجراء الفحوصات الكهربائية المُضمنة في معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Recommended Practices for Safety in High-Voltage and High-Power Testing] و المعهد الوطني الأمريكي للمعايير [ANSI National Electrical Safety Code] و مُنظمة إدارة السلامة والصحة المهنية [OSHA Specifications for Accident Prevention Signs and Tags]

6.4 التأكد من توصيل خزان المحول (Transformer Tank) والقلب الحديدي (Iron Core) بالأرض طيلة مدة الفحص.

6.5 فتح أطراف الفولتية المنخفضة (LV side terminals) والفولتية المرتفعة (HV side terminals) وذلك بإزالة الموصلات عنها (Removing HV&LV Cables or Busbars) كذلك الحال بنقطة التعادل (Neutral point) للمحول إن وجدت.

تحذير: يجب تأريض كوابل الفولتية المرتفعة إما عبر مُستعزلات التأريض الثابتة (Earthing Dis-connector) أو المتنقلة (Portable) قبل البدء بفك هذه الكوابل عن عوازل إختراق المحولات (Bushings)، وذلك لما قد تحويه من فولتية حثية (Induction voltage) ناتجة عن المُعدات أو الحطوط الهوائية (Overhead Lines - OHL) المجاورة للمحول المُراد فحصه والمشحونة بفولتيات مرتفعة.



6.6 فصل أية أجزاء ثانوية مُرتبطة بملفات المحول من محولات فولتية (Voltage Transformers) وحارفة (مانعة) الصواعق (Surge Arresters) و المُكثفات (Capacitors) أو أية عدادات (Meters) وغيرها من الأنظمة الثانوية كوجود المُتحسسات الخاصة بقياس التفريغ الجري (PD Couplers).

6.7 تفريغ الشحنات المُحزنة بملفات المحول قبل الفحص (Trapped Charges) وذلك بعمل قِصر للملفات (Short circuit) وتأريضها لمدة من الزمن كما سيتم شرحه في آخر الفصل.

6.8 مراعاة أن تكون باقي الملفات الخاصة بالمحول مفتوحة (Open circuit) أثناء الفحص.

6.9 عمل التوصيلة الخاصة بهذا الفحص كما تم شرحه مسبقاً في فقرة توصيلة الفحص بعد التأكد من تنظيف أطراف المحول التي سيتم التوصيل عليها حتى لا تؤثر على قيمة الفحص.

6.10 تحديد مستوى التيار المُراد حقنه أخذين بعين الاعتبار قيمة المقاومة المُراد قياسها والفولتية، فكلما رفعنا قيمة التيار إرتفعت قيمة الفولتية عند فحص نفس المقاومة في نفس درجة الحرارة (قانون أوم) لذلك يجب الموازنة بين التيار المحقون والفولتية.

فعند إختيار قيمة تيار الفحص يجب مراعاة الآتي:

✓ أن تكون قيمة تيار الفحص أكبر من قيمة تيار التهيج (Excitation Current) للمحول بمقدار (2-4) مرات وذلك لتحقيق التشبع المغناطيسي للقلب الحديدي.

✓ عادة ما يكون تيار الفحص من (10% - 0.1%) بالمئة من التيار الإسمي للمحول.

✓ أن لا يتجاوز تيار الفحص ما مقداره (15%) بالمئة من التيار الإسمي لما لذلك من تأثيرات حرارية سلبية على نتيجة الفحص كرفع درجة حرارة الملفات واختلاف قيمة المقاومة كما ورد في المعيار الصادر عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE, C57.12.90 2015].

وهناك بعض الإقتراحات العامة لقيمة تيار الفحص كالآتي:

✓ إذا كانت قيمة المقاومة المُراد قياسها أكبر من (100mΩ) ملي أوم، (10A) أمبير أو أقل من ذلك تعتبر كافية.

✓ إذا كانت قيمة المقاومة المُراد قياسها أقل من (100mΩ) ملي أوم، (20A - 50A) أمبير يُمكن أن تكون كافية، مع مراعاة عدم إرتفاع التيار عن (15%) بالمئة من التيار الإسمي كما ذكر مسبقاً

فمثلاً لو أردنا قياس مقاومة ملفات محول و كُنا على عِلم مُسبق أن قيمة مقاومة هذه الملفات (100mΩ) ملي أوم (بواسطة الفحوصات المُصنعية أو الموقعية أو الفحوصات السابقة) وكان التيار الإسمي لهذه الملفات (500A) أمبير؛ في هذه الحالة يُمكن إختيار تيار الفحص ليكون (10A) أمبير أي قُرابة (2%) من التيار الإسمي لتكون فولتية الفحص (1V) فولت.

ولكن في حال كانت قيمة مقاومة الملفات غير معلومة، يُحبذ البدء بقيمة تيار منخفضة قُرابة (0.1%) والإنتظار لحين إستقرار قيمة التيار والفولتية، وفي حال عدم الإستقرار يتم رفع قيمة التيار قليلاً وبشكل مُتدرج إلى حين إستقرار النتيجة مع مراعاة عدم زيادة التيار عن القيم المسموح بها.

6.11 في حال تم إستخدام الطريقة المباشرة (Voltmeter-Ammeter Method) وعمل إحدى التوصيلات في الأشكال (3-22,23&24) السابقة يجب إتباع الخطوات التشغيلية التالية والخاصة بالتوصيلة الموضحة في الشكل (3-22) كمثال:

✓ إغلاق المفتاح رقم 1 والإبقاء على المفتاح رقم 2 مفتوح.

✓ في حال إستخدام بطارية كمصدر فولتية فحص إنتقل للبقطة التالية، أم في حال إستخدام مصدر تيار ثابت (Regulated DC Power Supply) يجب تشغيل المصدر الكهربائي وبدء تطبيق الفولتية وفقاً لنوع المصدر للوصول لتيار الفحص المُراد.

- ✓ تشغيل ساعة الإيقاف (Stopwatch) في لحظة إغلاق المفاتيح رقم 1 في حالة إستخدام بطارية كمصدر، أو عند بدء حقن التيار في حال إستخدام مصدر تيار ثابت متحكم به (Regulated DC Power Supply) لقياس الزمن اللازم لإستقرار التيار.
- ✓ الإنتظار لحين ثبات قيمة التيار والفولتية، ومن ثم قراءة وتسجيل قيمتهما عبر جهاز قياس التيار 1 و جهاز قياس الفولتية، بحيث يتم أخذ أربع قراءات للفولتية والتيار على الأقل ومن ثم حساب المتوسط لهذه القراءات للوصول إلى قيمة المقاومة الأقرب للواقع.
- ✓ بعد الإنتهاء من الفحص وحساب قيمة المقاومة، نقوم بإغلاق المفتاح رقم 2 بواسطة عصا معزولة (Insulated Stick) و فتح المفتاح رقم 1 لبدء عملية التفريغ.
- ✓ عند ملاحظة وصول قراءة جهاز قياس التيار 2 والخاص بدائرة التفريغ (القِصْر) إلى الصفر يُمكن فتح المفتاح رقم 2 بواسطة عصا معزولة مع مراعاة عدم النظر مباشرة لشرارة القوس الكهربائي التي ستظهر لزمن قليل جداً قرابة الثانية (1s).
- ✓ إغلاق المفتاح رقم 2 وفتحته بنفس الطريقة عدة مرات للتأكد من أن الدائرة مفرغة تماماً.
- ✓ إزالة أسلاك التوصيل عن أطراف الملف (الموصل أعلى عازل الإحتراق) بحذر والإنتقال للملف التالي المُراد قياس مقاومته

6.12 في حال كانت الملفات المفحوصة تتكون من عدة ملفات فرعية أي في حالة وجود مُغيّر خطوة (Tap-Changer) يجب مراعاة الآتي:

- ✓ يُفضّل فحص جميع الخطوات الخاصة بالطور (A) مثلاً، ثم الإنتقال للطور الآخر وفحص جميع خطواته (Taps) وهكذا، و ذلك لكسب الوقت اللازم للتشعُّع المغناطيسي للقلب الحديدي.
- ✓ إذا كان مُغيّر الخطوة من نوع (DETC or OCTC) وبعد الإنتهاء من الفحص على جميع الخطوات (Taps)، يجب إعادة الفحص بعد إرجاع وضعيّة مُغيّر الخطوة (DETC) إلى الخطوة المرجعيّة أو التشعيلية (Reference Tap) أي الذي كانت عليه الملفات قبل الفحص وذلك للتأكد من عدم وجود فتح في الدائرة (Open circuit) قبل كهربية المحول (Transformer Energization).
- ✓ فمثلاً لو كانت وصعيّة مُغيّر الخطوة (Tap-changer) للمحول في حالة التشغيل الطبيعي عند الخطوة رقم (3)، و أردنا فحص مقاومة الملفات عند جميع الخطوات يُفضل أن يكون ترتيب الفحص كالتالي (3→5→4→3→2→1) على إعتبار أن مُغيّر الخطوة ذو خمس خطوات (5 Taps)، أي يجب الإنتهاء بالخطوة رقم (3) للسبب المذكورة سابقاً.
- ✓ يجب فصل مصدر التيار قبل تغيير وصعيّة مُغيّر الخطوة (Tap-changer) لتجنب حدوث شرارة قوس كهربائي من شأنها إلحاق الضرر بملامساته أو مقاومته الداخلية.
- ✓ معرفة نوع مُغيّر الخطوة (Tap-changer) فيما إذا كان خطي (Linear) أو ذو تبديل عكسي (Reverse) أو غيره من الأنواع كالنوع (Fine/Coarse)، وذلك لتكوين تصوّر أولي عن نمط قراءات المقاومة الناتجة من الفحص كما سيتم شرحه لاحقاً في فقرة تحليل نتائج الفحص.

6.13 بعد الإنتهاء من الفحص تماماً (أي على جميع الملفات والأطوار) نقوم بتفريغ الملفات وذلك من خلال وصلها بحمل أو وصلها بالأرض وكذلك يجب التخلص من تمغيط القلب الحديدي (Core Magnetization) وذلك وفقاً للطرق التي تم شرحها سابقاً فيما يخص تفريغ الملفات و الخطوات التي سيتم شرحها فيما يخص طرق إزالة تمغيط القلب الحديدي (Core De-magnetization). علماً بأن تفريغ الملفات (Winding Discharge) يتم عمله بعد فحص كل ملف والانتقال للملف الآخر وبعد الإنتهاء من الفحص تماماً، أما إزالة معنطة القلب (Core De-magnetization) فإنه يتم عملها مرة واحدة بعد الإنتهاء من الفحص تماماً أي على جميع الملفات والأطوار.

تحذير: لا تُقَم بإطفاء (Turn-off) مصدر الطاقة (DC Power Supply) أثناء تزويده للتيار في ملفات المحول لأنه لن يتحمل التفريغ الصادر عن هذه الملفات.



تحذير: لا تُكُن على التوالي في دائرة الفحص تحت أي ظرف من الظروف لأسباب متعلقة بالسلامة العامة، و المقصود هنا أنه لا يجب أن تلمس فرضاً أطراف عازل الإختراق بيد واحدة وبالبيد الأخرى أحد أطراف التوصيل الخاصة بالفحص (حتى وإن كانت دائرة الفحص مُطفئة).



فائدة عملية: لتقليل نسبة الخطأ في الفحص يجب مراعاة قُطبية المغنطة للقلب الحديدي (Polarity of Magnetization) أثناء القيام في الفحص أي تثبيت إتجاه حقن التيار للملفات المُراد فحصها وذلك للوصول لحالة تشبُّع القلب الحديدي (Core Saturation) بشكل أسرع كما ورد في معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Std C57.152-2013].



7. تصحيح القيمة المُقاسة

يُعد هذا الفحص من الفحوصات التي تتأثر قيمتها بتغيُّر درجة حرارة المادة الموصلة تحت الفحص والتي تتمثل بحرارة الملفات للمحولات المعمورة بالزيت بعد إستقرار درجة حرارة المحول كما تم ذكره مسبقاً، لذلك ولغايات مقارنة قِيَم المقاومات الناتجة عن هذا الفحص بِقِيَم فحوصات القَبُول المَصْنَعِيَّة (Factory Acceptance Test - FAT) أو المَوَقَعِيَّة (Site Acceptance Test - SAT) أو غيرها من القِيَم المَرَجَعِيَّة كنتاج الفحوصات الروتينية السابقة (Routine Test) لهذا الفحص، يجب تصحيح قيم المقاومات الناتجة من الفحص الى درجة الحرارة المَرَجَعِيَّة القياسية وهي عادة واحدة من هذه القِيَم التالية (20° أو 75° أو 85°) درجة مئوية حسب المعهد الوطني الأمريكي للمعايير (ANSI) وغيرها من المعايير العالمية وعادة ما يتم إعتماد درجة الحرارة المَرَجَعِيَّة (75°) درجة مئوية للفحوصات المَصْنَعِيَّة (FAT)، بحيث يتم التصحيح عبر تطبيق المعادلة (3.17) التالية والواردة في معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Std C57.152-2013]:

$$R_r = R_m \cdot \frac{(T_r + T_k)}{(T_m + T_k)} \quad (3.17)$$

حيث:

R_r : قيمة المقاومة نسبة للحرارة المرجعية (القيمة المُراد حسابها).

R_m : قيمة المقاومة المُقاسة.

T_r : الحرارة المرجعية (20° أو 75° أو 85°) درجة مئوية.

T_m : الحرارة التي تم قياس المقاومة عندها.

T_k : تساوي (234.5°) درجة مئوية للنحاس و (225°) درجة مئوية للألومنيوم، وقد تصل لـ (230°) درجة مئوية للألمنيوم المخلوط ببعض المعادن (Alloyed Aluminum).

مثال: تم قياس مقاومة ملفات نحاسية لمحول وكانت النتيجة ($50m\Omega$) ملي أوم عند درجة حرارة ملفات (30°) درجة مئوية، ولغايات مقارنة قيمة المُقاومة المُقاسة مع قيمة مقاومة الملفات الواردة في فحص القبول المصنعي لهذا المحول (FAT) فُهم بتصحيحها لدرجة الحرارة المرجعية علماً بأن درجة الحرارة المرجعية لفحص القبول المصنعي (FAT) مساوية لـ (75°) درجة مئوية؟

الحل:

قيمة المقاومة المُقاسة عند (30°) درجة مئوية تساوي ($50m\Omega$) ملي أوم.

درجة الحرارة المرجعية (75°) درجة مئوية.

نوع الملفات نحاسية.

بالرجوع للمعادلة (3.17)

$$R_{75^\circ} = R_{30^\circ} \cdot \frac{(T_{75^\circ} + T_{234.5^\circ})}{(T_{30^\circ} + T_{234.5^\circ})}$$

$$R_{75^\circ} = 50m\Omega \cdot \frac{(75^\circ + 234.5^\circ)}{(30^\circ + 234.5^\circ)}$$

$$R_{75^\circ} = 58.51m\Omega$$

بعد ذلك يُمكن مقارنة قيمة المقاومة المُقاسة بعد تصحيحها لدرجة الحرارة المرجعية (75°) درجة مئوية مع قيمة المقاومة الواردة في فحص القبول المصنعي (FAT) عند درجة الحرارة المرجعية ذاتها (75°).

كما وتُجدر الإشارة إلى أنه في حال مقارنة نتيجة مقاومة الملفات بين الأطوار المختلفة (Phases comparison) لا يلزم تصحيح الحرارة قبل المُقارنة وذلك لأن الحرارة عند قياس مقاومة الملفات للأطوار الثلاثة تكون تقريباً متساوية.

8. تحليل نتائج الفحص

تتراوح قيمة مقاومة ملفات المحول من بضع عشرات من الملي أوم إلى عدة أومات (Ohms)، ولتحليل قيمة مقاومة الملفات المُقاسة بعد تصحيحها كما ذكر سابقاً يُمكن إتباع واحدة من الطرق التالية:

8.1 الطريقة الأولى: مقارنة نتائج الفحص بنتائج فحوصات القبول القصصية (Factory Acceptance Test – FAT) أو الموقعية (Site Acceptance Test – SAT) أو غيرها من القيم المرجعية كنتائج الفحوصات الروتينية السابقة (Routine Test) لهذا المحول بنسبة تباين قرابة الـ(5%) بالمئة أو أقل كما ورد في معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Std C57.152-2013]، و بنسبة تباين (1%) بالمئة كما ورد في الدراسة الصادرة عن المجلس الدولي للأنظمة الكهربائية الكبيرة [CIGRE Guide for Transformer Maintenance 445].

8.2 الطريقة الثانية: مقارنة نتائج الفحص بنتائج فحص لمحول مُشابه تماماً (Twin or Sister) بنسبة تباين قرابة الـ(2%) بالمئة أو أقل.

8.3 الطريقة الثالثة: مقارنة نتائج الفحص بين الأطوار المختلفة بنسبة تباين قريبة من الـ(2%) بالمئة ولا تتجاوز الـ(5%) بالمئة من القيمة كما ورد في معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Std C57.152-2013]، و بنسبة تباين (3% - 2%) بالمئة كما ورد في الدراسة الصادرة عن المجلس الدولي للأنظمة الكهربائية الكبيرة [CIGRE Guide for Transformer Maintenance 445].

وفي حال قياس مقاومة ملفات محول وكانت الملفات موصولة على شكل نجمة (Y - Star) وكانت نقطة التعادل (Neutral point) غير ظاهرة (أي أنه موصول بطريقة النجمة داخلياً) أو في حال كانت الملفات المفحوصة موصولة على شكل مثلث (Δ - Delta)، يُمكن الإعتماد على الجدول (3-1) لمعرفة أنماط قراءات الفحص الأكثر شيوعاً في حال وجود عطل في الملفات، ولتحديد نوع العطل الداخلي للمحول فيما إذا كان قطع كُلي (Open circuit) أو جزئي (Crack) أو هنالك قصّر في الملفات (Short circuit) أو وجود نقاط توصيل رديئة يُمكن الإعتماد على الجدول (3-2).

الجدول رقم (3-1)

	توصيلة الملفات	نجمة - Y - Star			مثلث - Δ - Delta		
		قيمة المقاومة حسابياً (L-L)			0.33Ω		
النمط الأول	نمط القيمة المُقاسة	$R_{AB} = 1\Omega$	$R_{BC} = \infty$	$R_{AC} = \infty$	$R_{AB} = 0.5\Omega$	$R_{BC} = 0.5\Omega$	$R_{AC} = 1\Omega$
		إحدى قِيَم المقاومة (L-L) طبيعية، وقيمتين لا يُمكن قياسهما (مقاومة كبيرة جداً)			قيمة مقاومة (L-L) أكبر من القيمة الطبيعية بثلاث مرات، وقيمتين أكبر من القيمة الطبيعية بمرّة ونصف		
النمط الثاني	نمط القيمة المُقاسة	$R_{AB} = \infty$	$R_{BC} = \infty$	$R_{AC} = \infty$	$R_{AB} = 0.5\Omega$	$R_{BC} = \infty$	$R_{AC} = \infty$
		جميع قِيَم المقاومة (L-L) الثلاثة لا يُمكن قياسها (مقاومة كبيرة جداً)			قيمة مقاومة (L-L) أكبر من القيمة الطبيعية بمره ونصف، وقيمتين لا يُمكن قياسهما (مقاومة كبيرة جداً)		
النمط الثالث	نمط القيمة المُقاسة	$R_{AB} = 1\Omega$	$R_{BC} = 0.9\Omega$	$R_{AC} = 0.9\Omega$	$R_{AB} = 0.32\Omega$	$R_{BC} = 0.32\Omega$	$R_{AC} = 0.29\Omega$
		إحدى قِيَم المقاومة (L-L) طبيعية، وقيمتين أقل من القيمة الطبيعية			جميع قِيَم المقاومة (L-L) الثلاثة أقل من القيمة الطبيعية، وتكون إحدى هذه القيم أقل من الآخريات		
النمط الرابع	نمط القيمة المُقاسة	$R_{AB} = 0.9\Omega$	$R_{BC} = 0.8\Omega$	$R_{AC} = 0.9\Omega$	$R_{AB} = 0.31\Omega$	$R_{BC} = 0.28\Omega$	$R_{AC} = 0.28\Omega$
		جميع قِيَم المقاومة (L-L) الثلاثة أقل من القيمة الطبيعية، وتكون إحدى هذه القيم أقل من الآخريات			جميع قِيَم المقاومة (L-L) الثلاثة أقل من القيمة الطبيعية، وتكون قيمتين من هذه القيم أقل من القيمة الثالثة		
النمط الخامس	نمط القيمة المُقاسة	$R_{AB} = 1\Omega$	$R_{BC} = 1.1\Omega$	$R_{AC} = 1.1\Omega$	$R_{AB} = 0.34\Omega$	$R_{BC} = 0.34\Omega$	$R_{AC} = 0.38\Omega$
		إحدى قِيَم المقاومة (L-L) طبيعية، وقيمتين أكبر من القيمة الطبيعية			جميع قِيَم المقاومة (L-L) الثلاثة أكبر من القيمة الطبيعية، وتكون إحدى هذه القِيَم أكبر من الآخريات		
النمط السادس	نمط القيمة المُقاسة	$R_{AB} = 1.1\Omega$	$R_{BC} = 1.2\Omega$	$R_{AC} = 1.1\Omega$	$R_{AB} = 0.35\Omega$	$R_{BC} = 0.39\Omega$	$R_{AC} = 0.39\Omega$
		جمع قِيَم المقاومة (L-L) الثلاثة أكبر من القيمة الطبيعية، وتكون إحدى هذه القِيَم أكبر من الآخريات			جميع قِيَم المقاومة (L-L) الثلاثة أكبر من القيمة الطبيعية، وتكون قيمتين من هذه القِيَم أكبر من القيمة الثالثة		

*الأرقام الواردة في الجدول أعلاه (قِيَم المقاومات) عبارة عن أمثلة لغايات الشرح فقط.

الجدول رقم (2-3)

النمط *	نوع العطل المتوقع
الأول	<ol style="list-style-type: none"> وجود فتح في الدائرة ناتج عن قطع في نقاط التوصيل بين ملفات المحول و موصلات عوازل الإختراق أو مُغيّر الخطوة على أحد الأطوار. أحد ملفات المحول الثلاثة مقطوع قطع كلي (طور واحد). عطل داخلي في مُغيّر الخطوة على أحد الأطوار.
الثاني	<ol style="list-style-type: none"> وجود فتح في الدائرة ناتج عن قطع في نقاط التوصيل بين ملفات المحول و موصلات عوازل الإختراق أو مُغيّر الخطوة على طورين. ملفين من ملفات المحول الثلاثة مقطوعين قطعاً كلياً (طورين من ثلاثة). عطل داخلي في مُغيّر الخطوة على طورين.
الثالث	<ol style="list-style-type: none"> وجود قِصر في أحد ملفات المحول الثلاثة (طور واحد).
الرابع	<ol style="list-style-type: none"> وجود قِصر في ملفين من ملفات المحول الثلاثة (طورين من ثلاثة).
الخامس	<ol style="list-style-type: none"> وجود نقاط توصيل رديئة بين أسلاك الفحص والموصل على طور واحد. وجود نقاط توصيل رديئة داخل المحول، كنقطة لإلتقاء موصل عازل الإختراق بموصلات الملفات أو نقطة توصيل الملفات بمُغيّر الخطوة على طور واحد. وجود قطع جزئيّ بالملفات على طور واحد.
السادس	<ol style="list-style-type: none"> وجود نقاط توصيل رديئة بين أسلاك الفحص والموصل على طورين. وجود نقاط توصيل رديئة داخل المحول، كنقطة لإلتقاء موصل عازل الإختراق بموصلات الملفات أو نقطة توصيل الملفات بمُغيّر الخطوة على طورين. وجود قطع جزئيّ بالملفات على طورين.

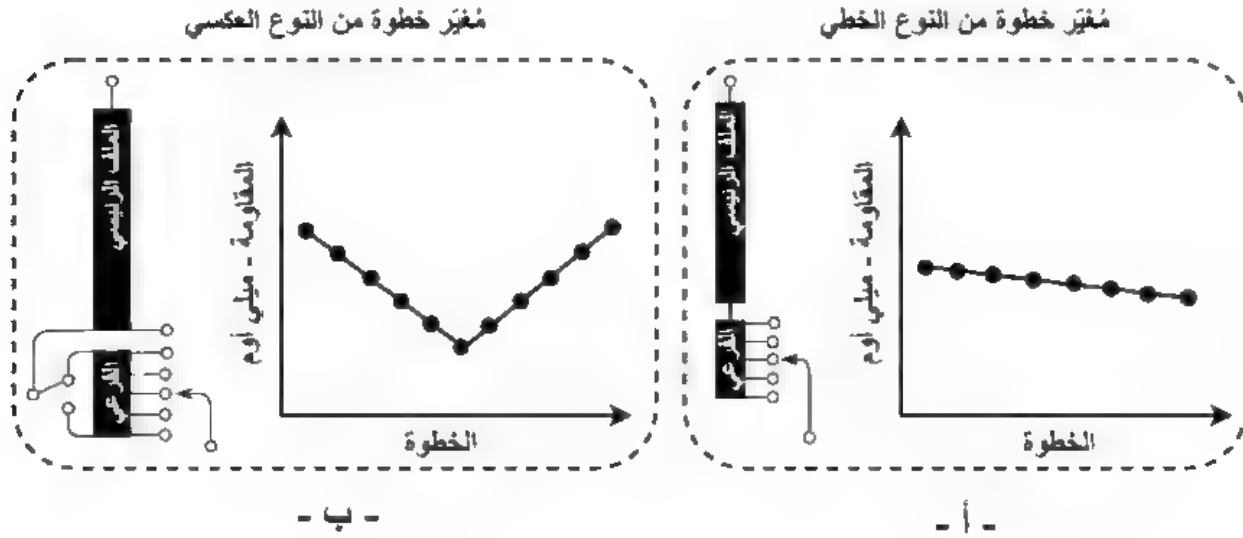
*يُمكن الرجوع للجدول (1-3) لمعرفة رقم النمط ونوعه

ملحوظة (3-4): عادة ما تكون قيمة مقاومة ملفات العولتية المرتفعة (HV Winding) أكبر من نظيرتها لملفات العولتية المنخفضة (LV Winding) نظراً لكثرة عدد اللغات ويصغر حجم المقطع لموصلات هذه الملفات، لذلك فإن التغيّر الطفيف على قيمة هذه المقاومة الكبيرة الخاصة بملفات الفولتية المرتفعة نتيجة لوجود مشكلة في الملفات قد لا يُمكن ملاحظته بسهولة على العكس من مقاومة ملفات الفولتية المنخفضة (LV Winding) ذات المقاومة الصغيرة قرابة بصع ملي أوم والتي يسهل إكتشاف التغيّر الطفيف في قيمتها.



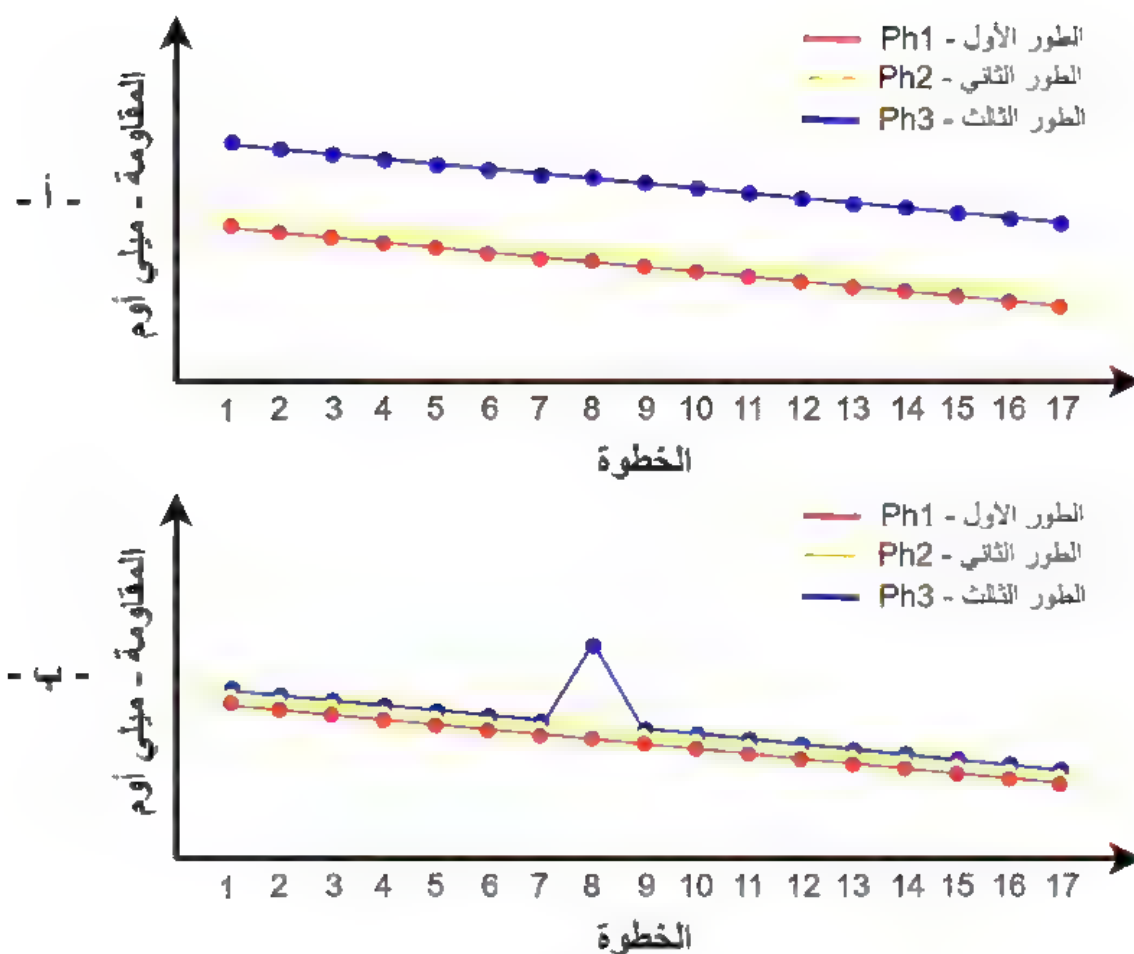
عند تحليل نتائج فحص المقاومة الإستاتيكي (Static Winding Resistance Test) لملفات محول تتكون من عدة خطوات (أي بوجود مُغيّر خطوة)، وإلى جانب مقارنة قيمة المقاومة كما ذكر سابقاً يُنصح برسم العلاقة بين قيم مقاومة الملفات المُقاسة ورقم الخطوة (Tap)، وذلك لتسهيل عملية التحليل عبر ملاحظة خطية (Linearity) المنحى الناتج عن رسم هذه العلاقة بالإضافة إلى التأكد من تطابق المنحى الخاص بالأطوار الثلاثة.

ويوضح الشكل [(3-27) (أ)] العلاقة سابقة الذكر لملفات محول بمُغَيِّر خطوة من النوع الخطي (Linear OLTC)، والشكل [(3-27) (ب)] لملفات محول بمُغَيِّر خطوة من النوع العكسي أو كما يُسمى بمُغَيِّر خطوة ذو تبديل عكسي (Reversing Changeover OLTC)، بحيث يُمكن ملاحظة خطية المنحنى بالإضافة إلى تطابق المنحنى للأطوار الثلاثة.



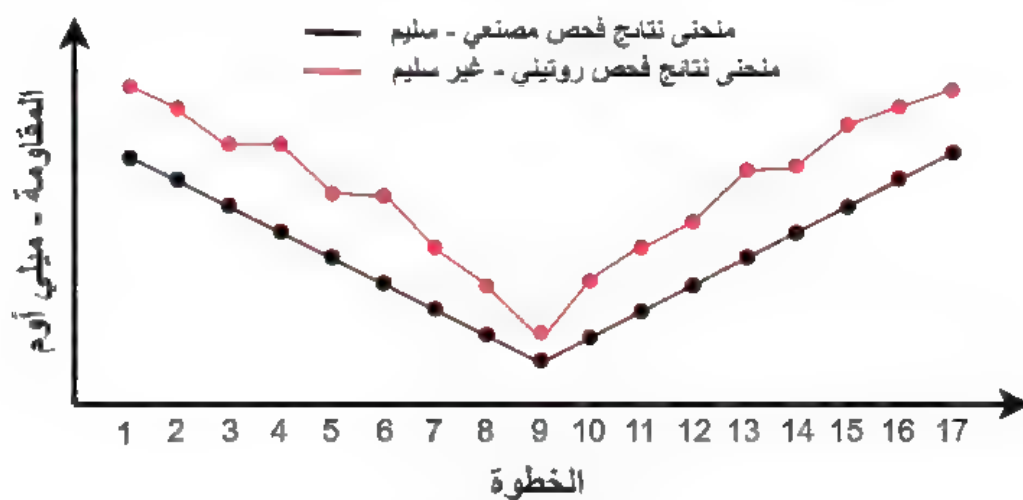
الشكل رقم (3-27)

في حال لم يُكُن منحنى قيم المقاومات خطياً كما هو مُبين بالشكل (3-27) السابق لكل من نوعي مُغَيِّر الخطوة فإن هذا ينم عن وجود عطل ما في مُغَيِّر الخطوة، ومن الأعطال الشائعة في مُعَيِّرات الخطوة تآكل أو تأكسد ملامساته الخاصة بمفتاح التحويل (Diverter Switch) أو مُحدد الخطوة (Tap Selector) بالإضافة إلى وجود إرتجاج في نقاط التوصيل وعبره من الأعطال. الشكل [(3-28) (أ)] يُبين منحنى مقاومة خاص بمحول ذو مُغَيِّر خطوة من النوع الخطي (Linear OLTC) بحيث يُمكن ملاحظة عدم تطابق المنحنى الخاص بأحد الأطوار مع بقية أطوار المحول مما يكشف وجود مشكلة في هذا الطور بالتحديد، والشكل [(3-28) (ب)] يُبين منحنى مقاومة حاص بمحول ذو مُغَيِّر خطوة من النوع الخطي (Linear OLTC) بحيث يُمكن ملاحظة ظهور بعض قِيَم المقاومة المرتفعة عند إحدى الخطوات الخاصة بهذا المُغَيِّر (Tap Changer) مما يُشير لوجود مشكلة محتملة في ملامسات هذه الخطوة (Tap) فقط.



الشكل رقم (3-28)

يُبين الشكل (3-29) منحنى مقاومة ملفات أحد أطوار محول ذو مُغَيِّر خطوة من النوع ذو التبديل العكسي (Reversing Changeover OLTC) بحيث يُمكن ملاحظة عدم خطيته وعدم مطابقته لمنحنى المقاومة المرجعي (المصنعي) الخاص بنفس المُغَيِّر لهذا الطور.



الشكل رقم (3-29)

الأشكال (29 & 28-3) السابقة تؤكد وجود عطل في مُعَيِّر الخطوة نفسه أو في نقاط إلتقاء موصلاته مع الملفات أو عوازل إختراق المحول (Bushings) ويجب التفصي عنها و إصلاحها وذلك بعد مراسلة الشركة المُصنَّعة ومراعاة توصياتها.

ومن الأمور التي يُنصح بها في حال وجود مُعَيِّر خطوة (Tap-Changer) عمل تمرين (Exercise) من فترة لأخرى صعوداً ودرولاً للخطوات (Taps) كافة من مرتين إلى ستة مرات سبواً وذلك للتخلص من تأكسد الملامسات، أما في ما يخص تآكلها أو أية أعراض أخرى للتقادم يجب مراعاة عمل الصيانات الشاملة (Overhauls) في مواعيدها المحددة من قبل مُصنَّع مُعَيِّر الخطوة (Tap-Changer) وإستبدال هذه الملامسات بأخرى جديدة في حال لزم الأمر.

ملحوظة (3-5): في حال وجود مُعَيِّر خطوة من نوع (OCTC or DETC) ولم يتم تغير وضعيته لفترة طويلة (أي أنه بقي على خطوة محددة لفترة طويلة من الزمن بالسنوات)، لا يُصح بعمل تمرين (Exercise) لهذا النوع من مُعَيِّرات الخطوة لما تنطوي عليه هذه العملية من مخاطر تتمثل في إحداث عطل لهذا المُعَيِّر نحن في غنى عنه.



9. العوامل المؤثرة على نتيجة الفحص

هناك عدة عوامل من شأنها التأثير على قيمة فحص مقاومة الملفات أو قد تزيد من صعوبة إجراء هذه الفحص وجبَ ذكرها من أجل تحييد تأثيرها أو التخفيف منه على الأقل عند إجراء هذا الفحص، ومن هذه العوامل:

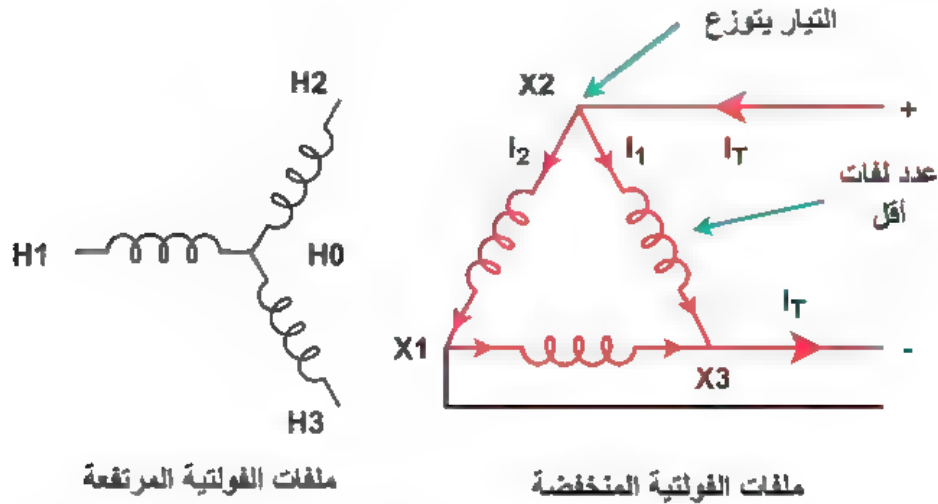
9.1 تيار الفحص – Test Current

كما هو معلوم أن تيار الفحص له تأثير مباشر على مُدة المحص ومدى دقته، لذلك يجب إختيار مستوى هذا التيار بعناية شديدة وفقاً للعديد من المعايير كحجم المحول ومقدار تياره الإسمي وطريقة توصيل ملفاته داخلياً وغيرها من المعايير، ففي حال رادت قيمة تيار الفحص عن نسبة مُعيَّنة من قيمة التيار الإسمي للملفات فإن ذلك من شأنه رفع درجة حرارة هذه الملفات والتسبب باختلاف قيمة المقاومة المُقاسة، حيث حددت معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات هذه النسبة بـ (15%) بالمثل من قيمة التيار الإسمي للملفات [IEEE Std C57.152-2013]. وعلى النقيض أيضاً وفي حال كانت قيمة تيار الفحص قليلة فإن ذلك سيؤدي إلى صعوبات في الفحص نتيجة لعدم وصول القلب الحديدي لحالة التشبُّع المغناطيسي وعدم إستقرار قيمة المقاومة كما سيتم شرحه في النقطة (9.3).

9.2 ملفات المحول الموصولة على شكل مثلث - Delta Connected Winding

في حال فحص ملفات المحول الموصولة على شكل مثلث (Δ - Delta) وخاصة إذا كانت هذه الملفات ذات الفولتية المنخفضة (LV winding) فإن ذلك من شأنه زيادة تعقيد هذا الفحص للأسباب التالية:

- صعوبة الوصول لحالة تشبع القلب الحديدي للمحول؛ عند فحص هذا النوع من الملفات وتبعاً لقلة عدد الملفات الخاصة بها (LV winding) مقارنة بملفات الفولتية المرتفعة (HV winding)، بالإضافة لتوزيع التيار بين الملفات الموصولة على شكل مثلث (Δ - Delta) كما هو مبين بالشكل (3-30)، فإن ذلك من شأنه زيادة صعوبة الوصول لحالة تشبع القلب الحديدي للمحول، حيث أن قوة التمتع أو كما تُسمى بالقوة الدافعة المغناطيسية (Magnetomotive Force - MMF) التي من شأنها وصول القلب الحديدي لحالة التشبع المغناطيسي تعتمد على عدد الملفات والتيار ($I \cdot N$) حيث (N) تمثل عدد الملفات و (I) تمثل التيار. وفي هذه الحالة يتم اللجوء لبعض الطرق كرفع تيار الفحص أو زيادة عدد الملفات كما سيتم شرحه في النقطة (9.3).



الشكل رقم (3-30)

- الزمن الطويل حتى تستقر قيمة التيار؛ عند فحص ملفات المحول الموصولة على شكل مثلث (Δ - Delta) تكون المقاومة المُقاسة أقل من المقاومة الفعلية للملفات بمقدار النصف تقريباً كما تم شرحه سابقاً في هذا الفصل، نتيجة لذلك فإن المُعامل الزمني اللازم لإستقرار التيار (t) والذي يساوي حاصل قسمة (L/R) سوف يزداد مؤدياً لزمن أطول حتى يستقر التيار وإستخراج قيمة مقاومة الملفات كما هو موضح في الشكل (3-4).

ومن الأسباب الأخرى لعدم إستقرار التيار عند فحص محول ذو مجموعة توصيل (Δ - Delta) هو أن هذه التوصيلة تسلك سلوك مشابه لدائرتي محاثتين معلقتين حيث أن الطاقة المضافة لهذه الدوائر والتي تكون على شكل تيار ثابت (DC) تبدأ بالدوران داخل هذه الدوائر المغلقة مما يزيد من زمن الوصول لحالة الإستقرار كما ورد في الكتيب التفصيلي الصادر عن شركة ميجر [MEGGER, AVTM830280 Rev.C]. لذلك قد تلجأ بعض مختبرات الفحص لفتح دائرة

الملفات الموصولة على شكل مثلث (Δ - Delta) بطريقة ما إن أمكن ذلك لتسهيل عملية فحص مقاومة هذه الملفات.

9.3 التشبع المغناطيسي للقلب الحديدي – Iron Core Saturation

من الشروط الأساسية التي يجب مراعاتها للحصول على قيمة مقاومة ملفات دقيقة و الوصول لحالة إستقرار تيار وفولتية الفحص هي تشبع القلب الحديدي للمحول (Core saturation) كما ذكر سابقاً في فقرة فلسفة الفحص، لذلك من كبرى الصعوبات التي تظهر أثناء فحص مقاومة الملفات الخاصة بالمحول هي عدم القدرة للوصول لحالة تشبع القلب الحديدي، خاصة في حالة قياس مقاومة ملفات الفولتية المنخفضة الموصولة على شكل مثلث (Delta LV winding) كما تم شرحه في النقطة (9.2) سابقة الذكر.

ومما يزيد الأمر تعقيداً صعوبة معرفة فيما إذا وصل القلب الحديدي لحالة التشبع أم لا، وللحد من مشكلة عدم تشبع القلب الحديدي للمحول يُمكن القيام بإحدى الطرق الآتية:

• زيادة قيمة تيار الفحص (DC Current)

عند قياس مقاومة ملفات فولتية منخفضة (LV winding) لمحول وكانت قيمة المقاومة متذبذبة لمدة طويلة وكان التيار المحقون قيمته (1%) بالمئة من التيار الإسمي مثلاً، في هذه الحالة أحد الاحتمالات المُسببة لهذه الحالة هو عدم وصل القلب الحديدي لحالة التشبع لذلك يجب زيادة التيار المحقون مثلاً إلى (5%) على أن لا تتجاوز ما مقداره (15% - 10%) من التيار الاسمي للملفات، وبذلك تكون قوة التميغط أو كما تُسمى بالقوة الدافعة المغناطيسية (Magnetomotive Force - MMF) إزدادت إلى قرابة الـ 5 أضعاف كما هو مبين بالمعادلة (3.20)، وعندها يُمكن الوصول الى حالة التشبع للقلب الحديدي للمحول ويُمكن تسجيل قيمة مقاومة الملفات بعد ثباتها

$$MMF = N \cdot I \quad (3.18)$$

بعد زيادة التيار خمس أضعاف تُصبح المعادلة

$$MMF = N \cdot (5I) \quad (3.19)$$

$$MMF = 5 N \cdot I \quad (3.20)$$

حيث؛

MMF : قوة التميغط أو كما تُسمى بالقوة الدافعة المغناطيسية. (أمبير.لفة)

N : عدد اللفات. (لفة)

I : التيار. (أمبير)

• زيادة قيمة فولتية الفحص (DC Voltage)

يعتمد الرمن اللازم للوصول إلى حالة تشبُّع القلب الحديدي للمحول على مستوى فولتية الملفات، فيحسب (Volt-seconds) للملفات يُمكن معرفة الرمن والفولتية اللازمة للوصول إلى حالة التشبُّع، بحيث يتم احتساب هذه القيمة (Volt-seconds) عن طريق تكامل المساحة تحت نصف دورة لموجة الفولتية وقسمتها على (2)، فمثلاً لمحول كهربائي فولتية ملفاته الإسمية (100kV) كيلو فولت وتردده (50Hz) هيرتر فإنه بحاجة لقاربة (450 Volt-seconds) فولت-ثانية حتى الوصول إلى حالة التشبُّع، أي إذا قمنا بتطبيق فولتية مقدارها (30V) فولت ستحتاج لزمان مقداره قاربة الـ (15s) ثانية للوصول إلى حالة التشبُّع، كما وتُجدر الإشارة إلى إختلاف هذه القيمة تبعاً لمقدار المغناطيسية المتبقية في القلب الحديدي (Residual Magnetism) كما ورد في [O. W. Iwansiw, The art and science of measuring the winding resistance of power transformers].

لذلك وللوصول إلى حالة التشبُّع المغناطيسي للقلب الحديدي للمحول يُمكن زيادة قيمة فولتية الفحص، حيث زيادة هذه الفولتية يزداد مقدار الفيض المغناطيسي كما هو مبين بالمعادلة (3.21) التالية:

$$\varphi = V \cdot T \quad (3.21)$$

حيث؛

φ : الفيض المغناطيسي. (فولت.ثانية)

V : الفولتية. (فولت)

T : الزمن. (ثانية)

وكما هو معلوم أن قوة التمكنط أو كما تُسمى القوة الدافعة المغناطيسية (MMF) المسؤولة عن تشبُّع القلب الحديدي للمحول تعتمد على مقدار الفيض المغناطيسي في القلب الحديدي كما هو موضح في المعادلة التالية:

$$MMF = \varphi \cdot \mathcal{R} \quad (3.22)$$

$$MMF = V \cdot T \cdot \mathcal{R} \quad (3.23)$$

حيث؛

MMF : قوة التمكنط أو كما تُسمى بالقوة الدافعة المغناطيسية.

V : الفولتية.

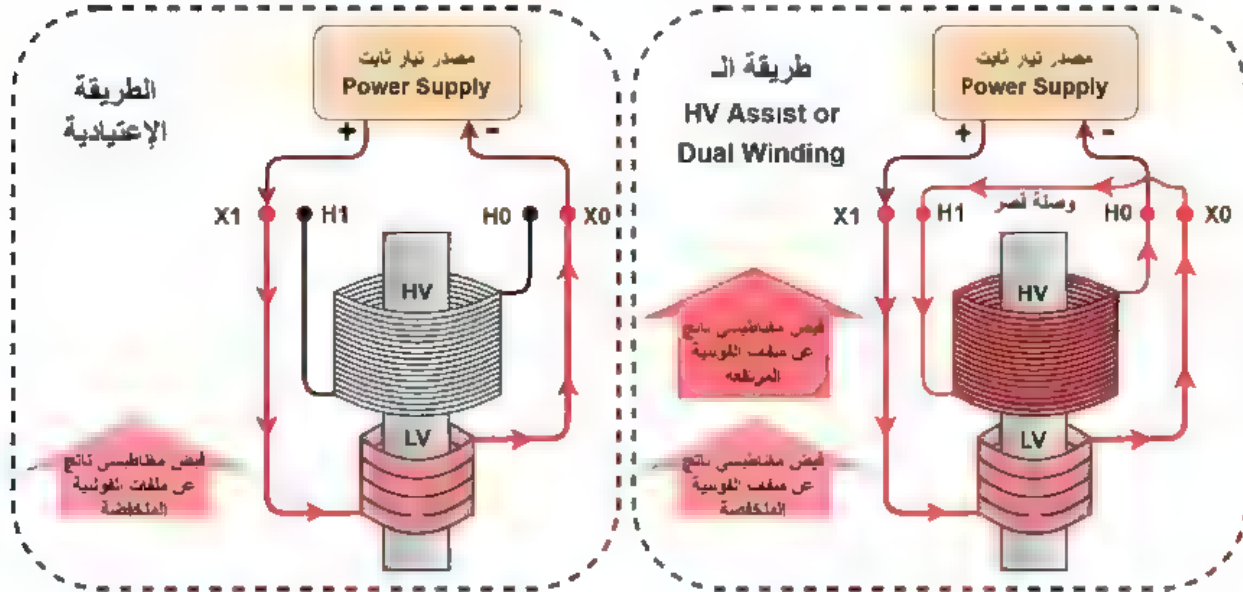
T : الزمن.

\mathcal{R} : الممانعة المغناطيسية (Reluctance)

• زيادة عدد اللفات

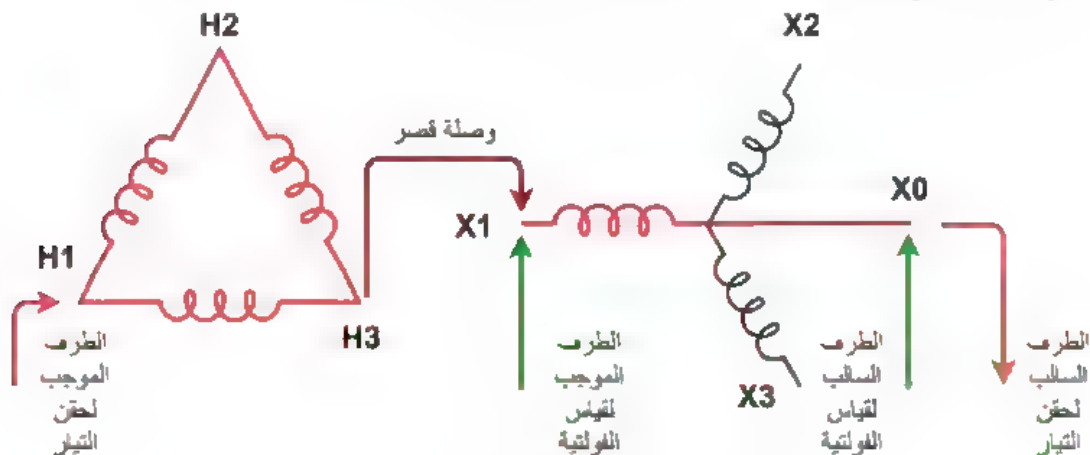
إن عدد اللفات المحقونة بتيار الفحص يتناسب مع قوة التمكنط للقلب الحديدي لذلك تُعد زيادة عدد هذه اللفات من الأمور المُساعدة للوصول لحالة التشبُّع المغناطيسي و يُكون ذلك بطريقتين :

○ الطريقة الأولى: وذلك بمساعدة ملفات الفولتية المرتفعة أو ما يُسمى بطريقة الـ (HV assist) أو طريقة الـ (Dual winding)، حيث يتم وصل ملف الفولتية المرتفعة (HV winding) للمحول مع ملف الفولتية المنخفضة (LV winding) لنفس الطور على التوالي مع مراعاة قطبية الملفات (Polarities) كما هو مبين بالشكل (3-31).



الشكل رقم (3-31)

حيث أن استخدام هذه الطريقة يزيد من عدد اللغات المحقونة بتيار الفحص، وكما هو معلوم أن قوة التمهيط أو كما تُسمى بالقوة الدافعة المعناتيسية (Magnetomotive Force - MMF) تردد بزيادة عدد اللغات (N) كما هو مبين بالمعادلة (3.18) السابقة والذي بدوره يؤدي إلى الوصول إلى حالة تشبع القلب الحديدي بشكل أسرع وأيضاً يُتيح قياس مقاومة ملفين في نفس الوقت كما هو موضح في الشكل (3-32)، فإلى جانب قياس الفولتية على أطراف الملف ($X1 - X0$) يُمكن أيضاً قياس الفولتية على أطراف ملفات الفولتية المرتفعة ($H1 - H3$) وحساب قيمة مقاومة هذا الملف أيضاً، حيث أن الشكل التالي يوضح استخدام هذه الطريقة (Dual winding) عند فحص محول ثلاثي الطور ثنائي الملفات ذو مجموعة توصيل (Dyn1) كمثال.



الشكل رقم (3-32)

عادةً ما يتم استخدام هذه الطريقة مع المحولات ذات مجموعة التوصيل ($\Delta - \Delta$)، حيث أنه كما ورد في [MEGGER, AVTM830280 Rev.C] فإن استخدام هذه الطريقة لمحول من هذا النوع ذو سعة Capacity حوالي (300kVA) كيلو فولت أمبير تقلل زمن الفحص من (14 min) دقيقة إلى (30s) ثانية

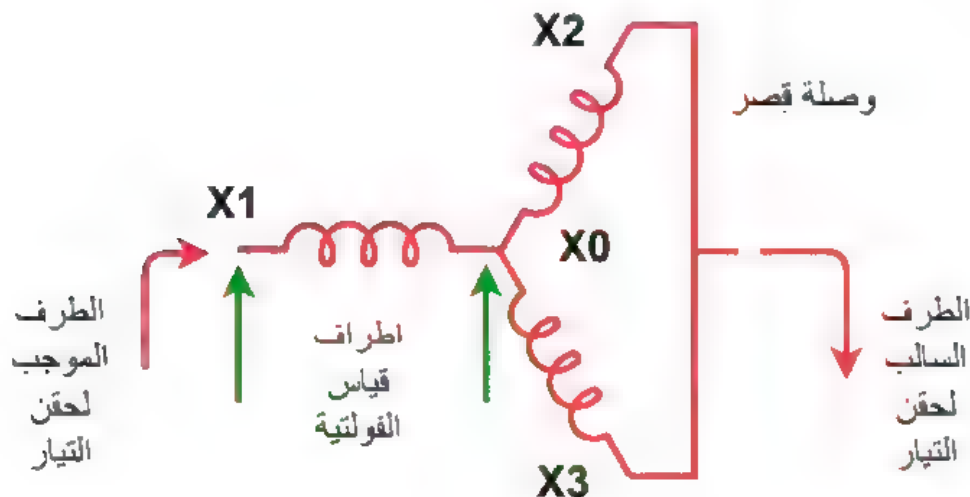
الجدول (3-3) يوضح النقاط التي يجب حقن التيار بها و النقاط التي يجب قياس الفولتية عندها في حال تطبيق هذه الطريقة (Dual winding) لبعض مجموعات التوصيل (Vector group)

الجدول رقم (3-3)

مجموعة التوصيل		أطراف حقن التيار وقصر الأطراف		قياس فولتية 1		قياس فولتية 2	
		الاطراف المقصورة		-	+	-	+
Ynd1	H1	H0-X1		H0	H1	X2	X1
	H2	H0-X2		H0	H2	X3	X2
	H3	H0-X3		H0	H3	X1	X3
Dyn11	H1	H2-X1		H2	H1	X0	X1
	H2	H3-X2		H3	H2	X0	X2
	H3	H1-X3		H1	H3	X0	X3

* فيما يخص باقي مجموعات التوصيل يُمكن الرجوع للمتحق رقم (3-1)

○ الطريقة الثانية: وتُسمى بطريقة إعادة توجيه التيار (Re-Directing Current) وهي خاصة بالملفات الموصولة على شكل نجمة (Star - Y) وذلك بعمل وصلة قصر (Short circuit) على الملفين الآخرين لتوصيلة النجمة بحيث يكون مدخل التيار من الملف المُراد فحص مقاومته ومخرج التيار من نقطة القصر بين الملفين الآخرين مع قياس الهبوط في الفولتية على الملف المُراد فحصه فقط (X1-X0) كما هو مُبين بالشكل (3-33).



الشكل رقم (3-33)

9.4 تأثير درجة حرارة الملفات – Winding Temperature

يُعد التغيُّر في درجة حرارة ملفات المحول من العوامل التي تؤثر على قيمة مقاومة الملفات، حيث أن تغيُّر في درجة حرارة الملفات الحاسوبية بمقدار درجة مئوية واحدة فقط يؤدي إلى تغيُّر في قيمة المقاومة بمقدار (0.39%) بالمئة.

لذلك يجب مراعاة الأمور التالية:

- ✓ **درجة حرارة المحول:** يجب التأكد من إستقرار المحول حرارياً قبل إجراء الفحص كما تم شرحه مسبقاً في فقرة الأمور التي يجب مراعاتها قبل البدء بالفحص.
- ✓ **وقت الفحص:** يُنصح بعمل الفحص في الأوقات التي تكون فيه درجة الحرارة الجوية غير مُتقلِّبة.
- ✓ **مُدَّة الفحص:** تعتمد مُدَّة الفحص على طريقة الفحص المستخدمة وعادةً ما نحتاج من ساعة إلى ساعتين بين أول قراءة وآخر قراءة يتم قياسها أثناء فحص مقاومة الملفات خاصة في حال وجود مُغيِّر خطوة (Tap Changer)، وهذا الوقت المُستغرق في إجراء الفحص يسمح بحدوث إحتلاف في درجة حرارة الملفات غير مرغوب به بين أول وآخر قراءة لذلك يجب تقليل زمن الفحص قدر الإمكان، وللتأكد من عدم تغيُّر درجة الحرارة يجب أخذ درجة حرارة الملفات قبل وبعد الفحص.
- ✓ **تيار الفحص:** إن زيادة قيمة تيار الفحص فوق القيم المسموح بها وهي (15%) بالمئة من التيار الإسمي بُعية الوصول إلى حالة التشُّع المغناطيسي للقلب الحديدي قد يؤدي إلى إرتفاع في درجة حرارة الملفات مما يؤثر سلباً على قيمة المقاومة المُقاسة كما تم شرحه سابقاً.

9.5 حجم المحول

تناسب قيمة مقاومة ومحاثّة ملفات المحول تناسباً طردياً مع مُربع الفولتية الإسمية للملفات وعكسياً مع سعة المحول، حيث أن ملفات الفولتية المرتفعة (HV winding) تحتوي على عدد لفات أكبر وهذا يعني قيمة محاثّة ومقاومة أكبر، والعكس بالعكس فيما يخصّ ملفات الفولتية المنخفضة (LV winding) فإنها تحتوي على عدد لفات أقل مما يعني قيمة محاثّة ومقاومة أقل لهذه الملفات.

9.6 فحص أحادي الطور أو ثلاثي الطور

يُمكن إجراء هذه الفحص بالطريقة أحادية الطور (Single phase) أي بإستخدام مصدر تيار ثابت واحد فقط بحيث يتم فحص الملفات واحداً تلو الآخر كما تم شرحه سابقاً أو بالطريقة ثلاثية الطور أي بإستخدام ثلاثة مصادر للتيار الثابت بفحص ملفات الأطوار الثلاثة بنفس الوقت، الجدول (3-4) يَحوي مقارنة بين الطريقتين فيما يخصّ أبرز الخصائص.

الجدول رقم (3-4)

وجه المقارنة	آحادي الطور Single Phase	ثلاثي الطور Three Phase
توصيلة الملفات تحت الفحص	يُمكن تطبيقه على الملفات الموصولة على شكل مثلث (Delta-Δ) ونجمة (Star-Y)	يُمكن تطبيقه على الملفات الموصولة على شكل نجمة (Star-Y) فقط
مدة الفحص	أكبر	أقل
مصدر التيار الثابت	بحاجة لمصدر واحد فقط	بحاجة لثلاثة مصادر
طريقة Dual winding	يُمكن إستخدامها هنا	لا يُمكن إستخدامها
نسبة الخطأ	-	في بعض الأحيان أقل من نظيرتها آحادية الطور

9.7 تأثير محولات الفولتية والتيار – Voltage and Current Transformers

إن وجود محول فولتية (Voltage Transformer - VT) على طور واحد من أطوار المحول قد يزيد من مقاومة هذا الطور وقد يُسبب بعض المشاكل عند تحليل قِيم نتائج فحص مقاومة الملفات وذلك عند المقارنة في قيم المقاومات بين الأطوار.

أما فيما يخص محولات التيار (Current Transformers - CT's) فإن المُستخدَم منها عادةً مع عوارل الإختراق (Bushings) المحول هي من النوع الحلقي (Ring type) والتي بدورها لا تؤثر على قيمة المقاومة، ولكن في حال إستخدام محول تيار ثنائي الملفات على أحد أطوار المحول فسيكون له نفس التأثير السابق فيما يخص محول الفولتية.

10. فحوصات إضافية دأعمة

تُعتبر المحولات من المُعدات ذات الأهمية القصوى في المنظومة الكهربائية لما لها من دور في ديمومة سريان التيار الكهربائي عن طريق ربط عناصر المنظومة الكهربائية جميعها بالإضافة إلى تكلفتها المادية المرتفعة، لذلك لا يُمكن الإعتماد على فشل فحص واحد لتقييم حالة المحول والبدء بعمل الإجراءات التصحيحية لهذا المحول، بل يجب عمل فحوصات أخرى من شأنها تأكيد ما تم الكشف عنه في هذا الفحص و تحديد نوع العُطل بالضبط ثم بعد ذلك يُصار لعمل الإجراء التصحيحي اللازم لهذا المحول و الذي قد يتطلب التواصل مع مُصنَّع هذا المحول.

فعند إجراء فحص مقاومة الملفات (WRM) وكانت نتائج الفحص غير مُرضية مما يعني وجود قطع كُلي أو حزني للملفات أو وجود قِصر بين اللفات أو وجود نقاط توصيل رديئة أو أية أعطال أخرى في مُغَيِّر الخطوة، لا بُد من إجراء بعض الفحوصات الأخرى للتأكد من وجود هذه الأعطال قبل البدء بالإجراءات

التصحيحية ومنها فحص الإستجابة الترددية للخسائر الشاردة (Frequency response of stray losses FRSL) بالإضافة لفحص الغازات الذائبة بالريت (Dissolved Gas Analysis - DGA) وملاحظة ارتفاع نسب ثلاث غازات مُجتمعة وهي غازات إحماء المعدن (Hot metal gasses) و المكونة من الغازات التالية (الميثان - CH_4 و الإيثان - C_2H_6 و الإيثيلين - C_2H_4) والتي تُعطي إنطباع عن حدوث إحماء في موصلات الملفات ناتج عن إرتفاع في قيمة المقاومة.

11. تفريغ الملفات وإزالة تَمَغْنُط القلب الحديدي

عادةً بعد فحص مقاومة العزل (Insulation Resistance - IR) وفحص مقاومة ملفات (Winding Resistance Measurement - WRM) أي عموماً بعد الفحوصات التي يتم من خلالها تطبيق فولتية وتيار ثابت (DC) والتي بدورها تقوم بشحن ملفات المحول (Winding Trapped Charge) وكذلك تؤدي لَتَمَغْنُط القلب الحديدي للمحول أو ما يُسمى بالـ (Core Magnetization)، فإنه من الضروري تفريغ شحنة الملفات (Winding Discharge) للانتقال من ملف لآخر وكذلك إزالة تَمَغْنُط القلب الحديدي (Core De-magnetization) بعد الإنتهاء من الفحص وقبل كهرة المحول (Transformer energization) أو إجراء فحوصات أخرى وذلك تجنباً لحدوث الظواهر التالية:

✓ حدوث صدمة حثية (Induction Kickback) ناتجة عن الطاقة المخزنة في محاثات ملفات المحول $(E = \frac{1}{2} I^2 L)$ والتي قد تنطوي على مخاطر من شأنها التأثير على الأشخاص و المعدات.

✓ ظهور تيارات عالية غير إعتيادية (High Inrush Current) عند كهرة المحول (Transformer Energization) والتي قد تصل لقيمة تيار القِصْر الأعظم في بعض الاحيان (Maximum Short-circuit Current) وتؤدي لعمل خاطئ لمرحلات الحماية الكهربائية.

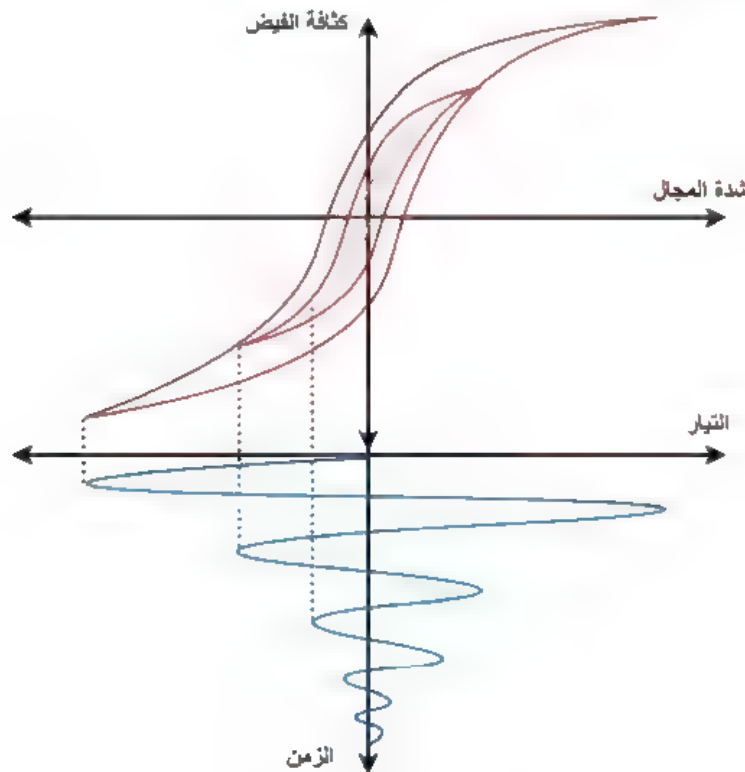
✓ ظهور نتائج غير دقيقة عند تطبيق الفحوصات التالية:

- الإستجابة الترددية للخسائر الشاردة Frequency Response of stray losses FRSL
- نسبة لفات المحول - Transformer Turns Ratio TTR
- مُفاعلة التسريب - Transformer Leakage Reactance
- تيار التهيج - Transformer Excitation Current
- تحليل الإستجابة الترددية المُسحي - Sweep Frequency Response Analysis

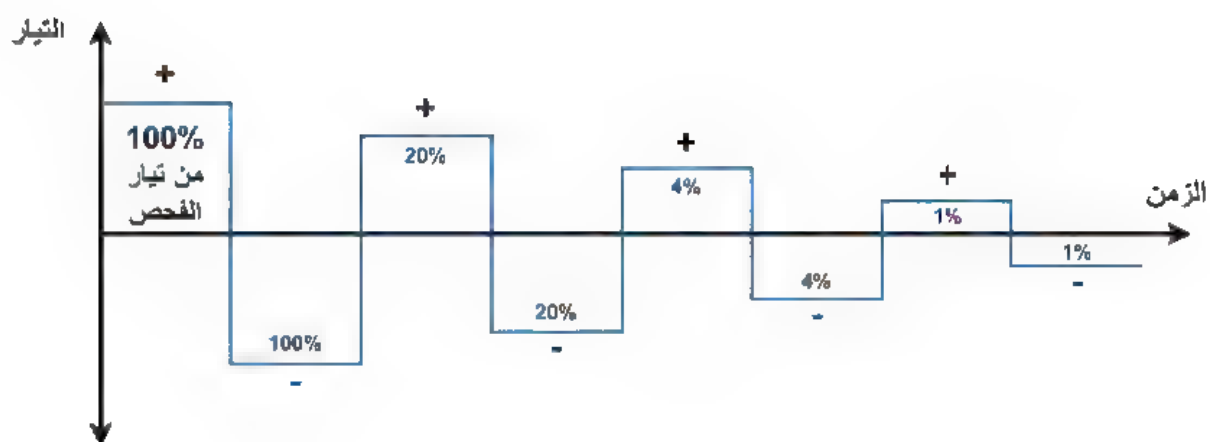
لذلك يجب تفريغ الطاقة المخزنة في الملفات (Winding Discharge) عند الانتقال من ملف لآخر وبعد الإنتهاء من الفحص تماماً وذلك عن طريق قِصْر (Short circuit) أطراف ملفات المحول ووصلها بالأرض لفترة زمنية مناسبة وتُقَدَّر بأربعة أصعاف زمن تطبيق الفولتية الثابتة على الملفات أثناء الفحص أو قُرابة 30 ثانية كما هو مذكور في بعض المراجع والمعايير، وعادةً أجهزة الفحص الحديثة والمُصنعة بواسطة شركة (MEGGER, OMICRON & METREL) تقوم بالتفريغ تلقائياً بعد الإنتهاء من إجراء الفحص.

أما فيما يخص إزالة تَمَغْنُط القلب الحديدي للمحول (Core De-magnetization) فإنه يتم بعدة طرق وهي:

- ✓ **طريقة التسخين:** في هذه الطريقة يتم تسخين المادة المراد إزالة تمغيطها لدرجة حرارة فوق درجة حرارة كيوري (Curie Temperature)، وهي درجة الحرارة التي تفقد عندها المادة خصائصها المغناطيسية فمثلاً للحديد المُكوّن للقلب الحديدي تساوي (770°) درجة مئوية ولكن هذه الطريقة لا يُمكن إستخدامها في المحولات نظراً لخطورتها على المادة العازلة.
- ✓ **طريقة حقن تيار متناقص:** في هذه الطريقة يتم حقن تيار متناقص في الملفات حتى الوصول إلى حالة عدم المعنطة ويتم ذلك بطريقتين وهي طريقة التيار المتردد (AC) كما هو موضح في الشكل (3-34) وهي طريقة قد تنطوي على بعض المحاطر فيما يخص السلامة العامة نظراً لإرتفاع قيمة الفولتية المتناقص، وعادة ما يتم إجراء هذه الطريقة في المختبرات المُجهزة ونادراً ما يتم عمل هذه الطريقة في الموقع، لذلك يتم اللجوء لطريقة التيار الثابت (DC) متردد القطبية (Alternating polarities) والمتناقص مع الزمن إلى حين التخلص من تَمَغْنُط القلب الحديدي للمحول كما هو موضح بالشكل (3-35) وذلك حسب معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Std C57.152-2013] حيث أن هذه الطريقة لا تحتاج لفولتية مرتفعة كنظيرتها للتيار المتردد سابق الذكر، وعادةً أجهزة الفحص الحديثة مثل (TESTRANO by OMICRON) و (MTO by MEGGER) تقوم بإزالة تَمَغْنُط القلب الحديدي (De-magnetization) بشكل تلقائي أو يدوي بعد الإنتهاء من إجراء الفحوصات التي تعتمد تطبيق فولتية وتيار ثابت (DC) على ملفات المحول كفحص مقاومة الملفات (WRM) كما هو مُبين بالملحق (3-5) في نهاية هذا الفصل.



الشكل (رقم 3-34)



الشكل رقم (3-35)

12. أمثلة على نتائج فحوصات مصنعية

121 المثال الأول: الشكل (3-36) يُبين قيم فحص مقاومة ملفات مصنعي (FAT) لمحول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (Three Phase Two Windings) موصول بطريقة (YNd11) ذو مُغَيَّر خطوة من نوع (DETC or OCTC).

Acceptance Test Certificates			
Customer:		MEASUREMENT OF WINDING RESISTANCE	Page No
		Standard	EC 60076-1
Rated Power, MVA		420 / 15	Report No
Rated Voltage, kV			vector Group
			YNd11

HV Windings				LV Windings			
Temperature		24 °C		Temperature		24 °C	
Pos	H ¹ -H ²	H ² -H ³	H ³ -H ¹	Pos	X ¹ -X ²	X ² -X ³	X ³ -X ¹
1	3.1870	3.1243	3.1605		2.8413	2.8271	2.8127
2	3.1443	3.1422	3.1371				
3	3.0970	3.1027	3.0628				
4	3.0543	3.0570	3.0470				
5	3.0101	3.0170	3.0122				

الشكل رقم (3-36)

12.2 المثال الثاني: الشكل (3-37) يُبين قِيمَ فحص مقاومة ملفات مَصْبِي (FAT) لمحول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (Three Phase Two Windings) موصول بطريقة (Dyn1) ذو مُعَيَر خطوة من نوع (OLTC).

Acceptance Test Certificate									
Customer			MEASUREMENT OF WINDING RESISTANCE					Page No	
			Standard IEC 60076-1					Serial No	
Rated Power (MVA) 25 / 30			Rated voltage (kV) 15 / 6.6					Report No	
								Vector Group Dyn1	

الشكل رقم (3-37)

12.3 المثال الثالث: الشكل (3-38) يُبين قيم فحص مقاومة ملفات قصبي (FAT) لمحول ثلاثي الأطوار ثلاثي ملفات (Three Phase Tertiary Windings) موصول على شكل (Dd0-d0) ذو مُغيّر خطوة من نوع (DETC or OCTC).

Measurement of winding resistance					
Oil temperature: 21 °C					
Winding	Tapping	$R_{L1} (\Omega)$	$R_{L2} (\Omega)$	$R_{L3} (\Omega)$	Unbalance rate (%)
HV winding	1	0.014098	0.014102	0.014111	
	2	0.013702	0.013763	0.013730	
	3	0.013357	0.013348	0.013355	
	4	0.012966	0.012963	0.012963	
	5	0.012698	0.012598	0.012602	
LV1 winding	Tapping	$R_{a1b1} (\Omega)$	$R_{b1c1} (\Omega)$	$R_{c1a1} (\Omega)$	Unbalance rate (%)
		0.009098	0.009055	0.009098	
LV2 winding	Tapping	$R_{a2b2} (\Omega)$	$R_{b2c2} (\Omega)$	$R_{c2a2} (\Omega)$	Unbalance rate (%)
		0.009163	0.009146	0.009165	

الشكل رقم (3-38)

الملحق (3-1)

الأطراف التي يجب قصرها والأطراف التي يجب القياس عليها عند تطبيق طريقة (HV assist) أو ما يُسمى بطريقة الـ (Dual windings) لمجموعات التوصيل المختلفة وذلك لزيادة عدد اللفات الحاملة لتيار الفحص [MEGGER, AVTMT0210 Rev.5].

قياس فولتية 2		قياس فولتية 1		أطراف حقن التيار وقصر الأطراف			مجموعة التوصيل
-	+	-	+	-	الاطراف المقصورة	+	
X3	X1	H3	H1	X3	H3-X1	H1	Dd0
X1	X2	H1	H2	X1	H1-X2	H2	
X2	X3	H2	H3	X2	H2-X3	H3	
X1	X0	H3	H1	X1	H3-X0	H1	Dyn7
X2	X0	H1	H2	X2	H1-X0	H2	
X3	X0	H2	H3	X3	H2-X0	H3	
X0	X1	H3	H1	X0	H3-X1	H1	Dyn1
X0	X2	H1	H2	X0	H1-X2	H2	
X0	X3	H2	H3	X0	H2-X3	H3	
X0	X1	H0	H1	X0	H0-X1	H1	YNyn0
X0	X2	H0	H2	X0	H0-X2	H2	
X0	X3	H0	H3	X0	H0-X3	H3	
X2	X1	H0	H1	X2	H0-X1	H1	YNd1
X3	X2	H0	H2	X3	H0-X2	H2	
X1	X3	H0	H3	X1	H0-X3	H3	
X2	X3	H3	H1	X2	H3-X1	H1	Dy1
X3	X1	H1	H2	X3	H1-X2	H2	
X1	X2	H2	H3	X1	H2-X3	H3	
X1	X2	H0	H1	X1	H0-X2	H1	YNd7
X2	X3	H0	H2	X2	H0-X3	H2	
X3	X1	H0	H3	X3	H0-X1	H3	
X1	X0	H2	H1	X1	H2-X0	H1	Dyn5
X2	X0	H3	H2	X2	H3-X0	H2	
X3	X0	H1	H3	X3	H1-X0	H3	
X3	X1	H3	H1	X3	H3-X1	H1	Dy11
X1	X2	H1	H2	X1	H1-X2	H2	
X2	X3	H2	H3	X2	H2-X3	H3	
X0	X1	H2	H1	X0	H2-X1	H1	Dyn11
X0	X2	H3	H2	X0	H3-X2	H2	
X0	X3	H1	H3	X0	H1-X3	H3	

الملحق (2-3)

تنويه

يضم هذا الملحق خطوات الفحص وتوصيلاته بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسّط. إستناداً على الخبرة بالتعامل مع هذه الأجهزة، وتَجَلُّر الإشارة أنه في حال إستخدام جهاز الفحص المُشار إليه في هذا الملحق لا يجب الإعتماد على هذا الملحق فقط، بل يجب قراءة الكُتبيات التفصيلية الخاصة بهذا الجهاز والمزودة بواسطة الشركة المُصنعة للجهاز جيداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية و السلامة العامة

فحص مقاومة ملفات المحول بإستخدام جهاز

Transformer Ohmmeter AVTM830280 by MEGGER



الشكل رقم (1-2-3)

يُعتبر هذا الجهاز من الإصدارات القديمة المُصنعة بواسطة شركة (MEGGER) لفحص مقاومة ملفات المحولات، حيث وجب الحديث عنه لوجوده بالخدمة إلى الآن في بعض محطات التوليد والمصانع.

• مواصفات الجهاز: حسب الـ (Instruction Manual AVTM830280, Catalog No. 830280)

- | | |
|-----------------------------|--|
| قدرة المدخل | : 120/240 V, 50/60 Hz, 350 VA |
| - آلية القياس | : إلكترونية بواسطة دائرة ثومبسون. |
| - آلية تزويد التيار | : توليد وتحكم إلكتروني. |
| نطاق تيار المخرج | : 5 mA, 50 mA, 500 mA, 5 A (dc) |
| فولتية فحص (OC) | : 30 V (dc) |
| - الحماية من إرتفاع الحرارة | : إغلاق تلقائي مع وجود لمبة إشارة تحذيرية عند تخطي حدود الحرارة المسموح بها على نطاق التيار (5 A). |
| - مدخل قياس المقاومة | : مدخلين منفصلين ذو ممانعة مرتفعة، لكل منهما نطاق مختلف عن الآخر وأيضاً توجد حماية من شرارة القوس الكهربائي الناتجة عن الـ (Inductive kick). |

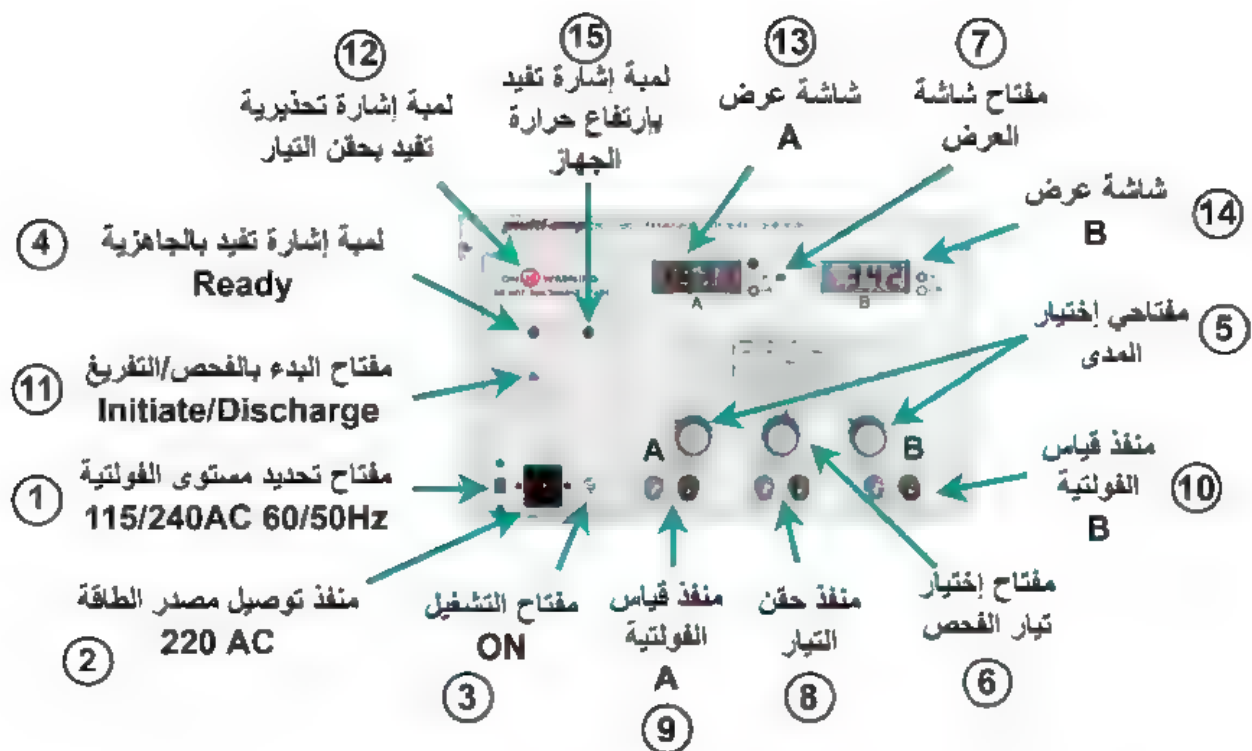
- نطاق المقاومات المُقاسة : حسب الجدول التالي.

Maximum Display	Resolution	Nominal
1.999 mΩ	0.001 mΩ	2 mΩ
19.99 mΩ	0.01 mΩ	20 mΩ
199.9 mΩ	0.1 mΩ	200 mΩ
1.999 Ω	0.001 Ω	2 Ω
19.99 Ω	0.01 Ω	20 Ω
199.9 Ω	0.1 Ω	200 Ω
1999 Ω	1.0 Ω	2000 Ω

- الدقة : $\pm 0.5\%$
- البيئة التشغيلية المحيطة : 32 to 104° F (0 to 40°C) RH to 80%
- البيئة التخزينية المحيطة : -40 to 149° F (-40 to +65°C)
- أبعاد الجهاز : 280 H x 406 W x 267 D mm
- وزن الجهاز : Net 40 lb. (18 kg)

• خطوات الفحص بواسطة هذا الجهاز:

1. التأكد من تطبيق الخطوات (6.1 إلى 6.8) الواردة في فقرة خطوات الفحص من فصل فحص مقاومة الملفات.
2. التأكد من أن الدائرة المُراد فحصها غير مُكهربة وعدم وجود احتمالية لكهربتها أثناء الفحص
3. تجنب لمس دائرة الفحص أثناء إجراء الفحص أو بعده، إلا بعد التأكد من عدم وجود فولتية وأن الملفات تم تفريغها من الشحنات المخزنة تماماً.
4. التأكد من أن أسلاك التوصيل الخاصة بجهاز الفحص (Test leads) وكذلك المشابك الخاصة بها (Clamps) في حالة جيدة وغير متسحة ولا تعاني من أية أضرار فيزيائية كالشقوق أو الكسور.
5. التأكد من أن جهاز الفحص المُراد استخدامه مُعاير (Calibrated).
6. قبل البدء بالفحص يُفضّل التعرف على أجراء الواجهة الرئيسية للجهاز من شاشة ومنافذ وأزرار ومفاتيح تحكم ولمبات إشارة كما هو مبين بالشكل (2-2-3).



الشكل رقم (3-2-2)

7. تهيئة منطقة الفحص عبر مراعاة الأمور التالية:

- 7.1 التأكد من أن منطقة الفحص جافة قدر الإمكان.
- 7.2 التأكد من عدم وجود مواد قابلة للإشتعال في منطقة الفحص.
- 7.3 التأكد من التهوية الجيدة لمنطقة الفحص فيما إذا كانت مغلقة.
- 7.4 التأكد من سلامة نظام التأريض في منطقة الفحص.
- 7.5 وضع حواجز حول منطقة الفحص وشواخص تفيد بوجود فحص دو فولتية وتيار خطر

8 إحضار جهاز الفحص (AVTM830280) إلى الموقع مع مراعاة وضع الجهاز بالظل وعدم تعريضه لأشعة الشمس المباشرة لوقت طويل، حيث أن الحرارة التشغيلية للجهاز يجب ألا تزيد عن (40°) درجة مئوية.

تحذير: لا تستخدم جهاز الفحص في الأجواء القابلة للإنفجار (Explosive atmosphere).



9. تحديد مستوى فولتية المصدر المناسبة عبر المفتاح رقم (1) الظاهر في الشكل (3-2-2) بإختيار (240VAC 50Hz)، ومن ثم توصيل جهاز الفحص بمصدر الطاقة الكهربائية عبر المنفذ (2).
10. التأكد من وضعية المفاتيح الظاهرة في الشكل (3-2-2) كالآتي:
 - 10.1 مفتاح التشغيل رقم (3) على وضعية (OFF).
 - 10.2 مفتاح شاشة العرض رقم (7) للأعلى.

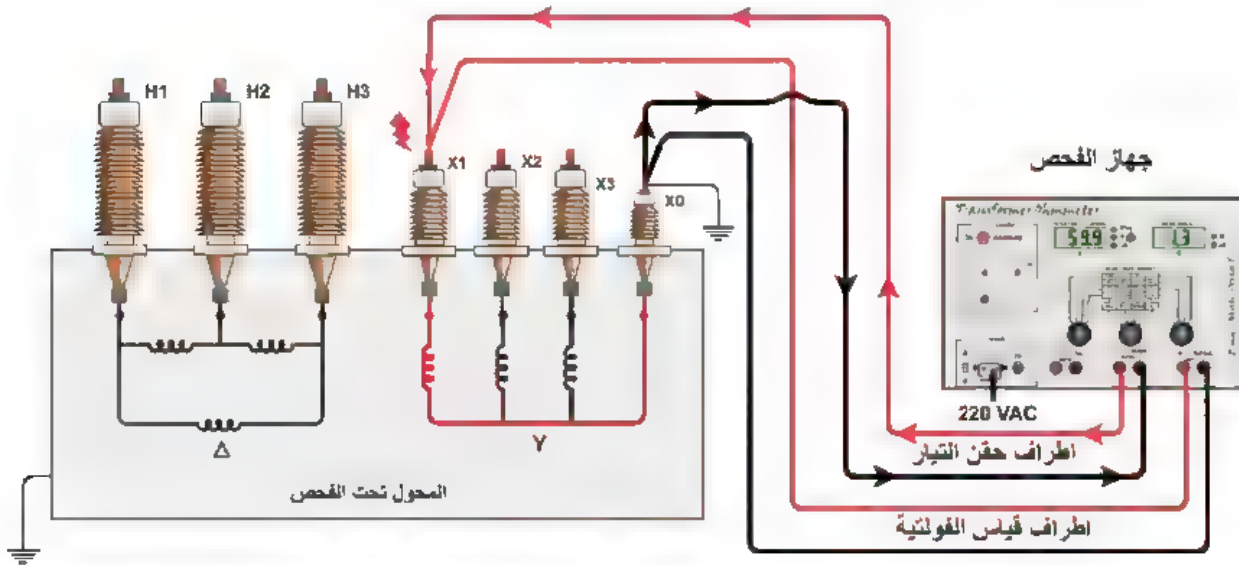
10.3 مفتاح إختيار المدى رقم (5) (A) أقصى اليسار.

10.4 مفتاح إختيار المدى رقم (5) (B) أقصى اليمين.

10.5 مفتاح إختيار التيار رقم (6)، يتم من خلاله تحديد قيمة تيار الفحص المراد حقنه (5mA, 50mA, 500mA, 5A وفقاً لقيمة مقاومة الملفات المراد قياسها وقيمة التيار الإسمي لهذه الملفات.

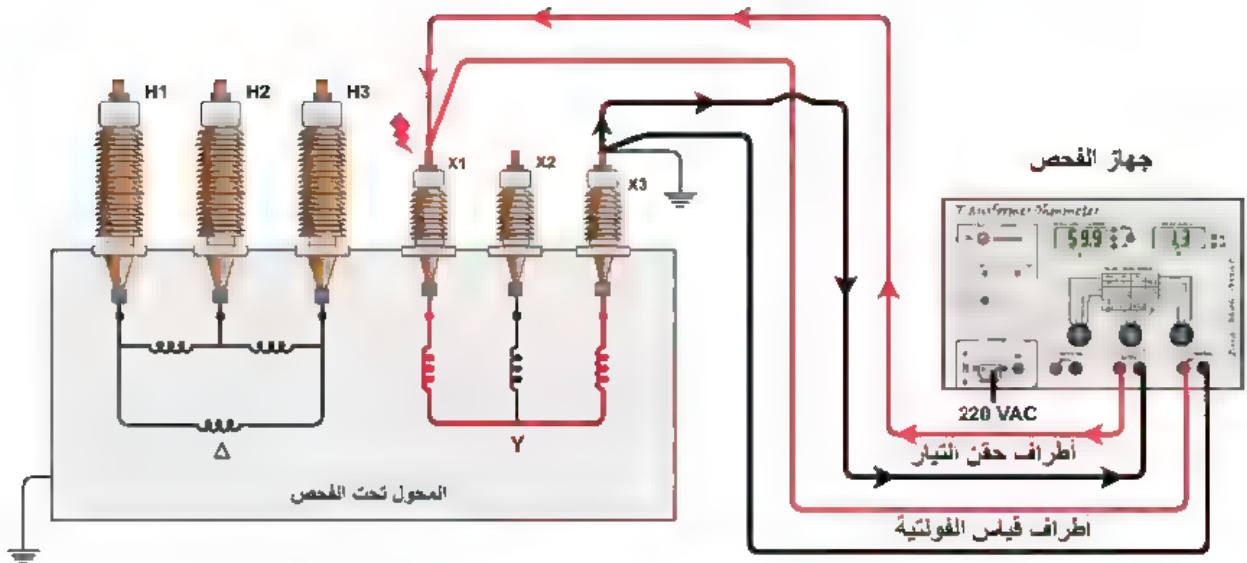
11. عمل توصيلة الفحص وفقاً لنوع الملفات المراد فحصها كالآتي:

11.1 في حال كانت ملفات المحول المراد فحصها موصولة على شكل نجمة (Star - Y) مع إمكانية الوصول إلى نقطة التعادل (Accessible Neutral Point)، يُمكن تطبيق التوصيلة الموضحة في الشكل (3-2-3) والتي تبين التوصيلة الخاصة بقياس مقاومة الملف (X1 - X0).



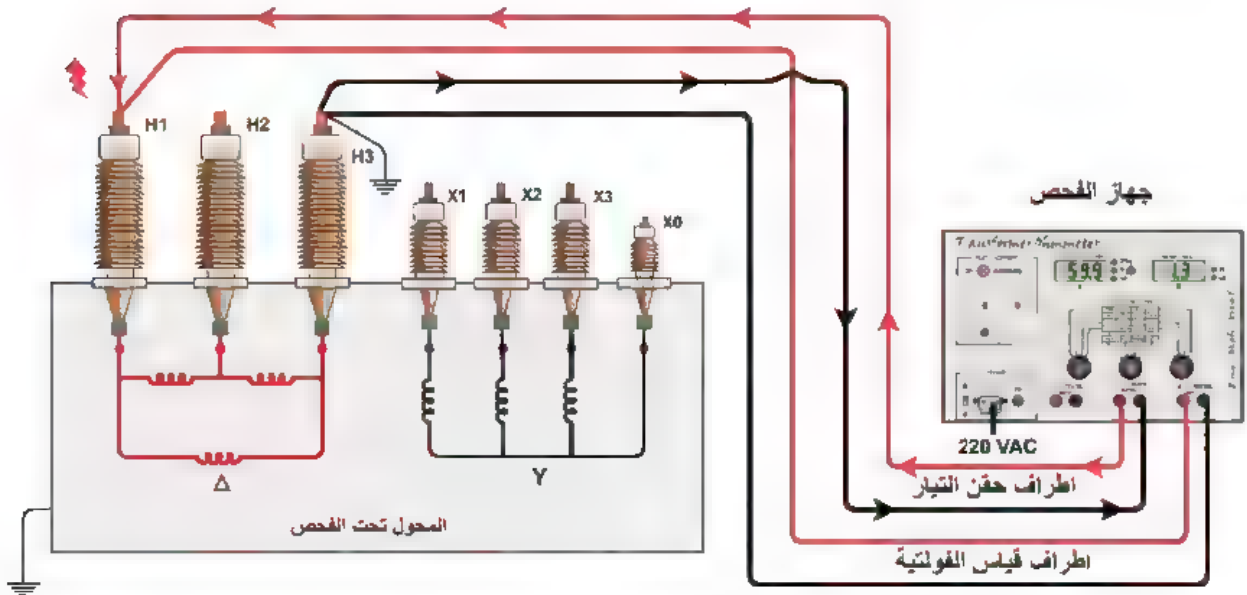
الشكل رقم (3-2-3)

11.2 في حال كانت ملفات المحول المراد فحصها موصولة على شكل نجمة (Star - Y) مع عدم إمكانية الوصول إلى نقطة التعادل (Not Accessible Neutral Point)، يُمكن تطبيق التوصيلة الموضحة في الشكل (3-2-4) والتي تبين التوصيلة الخاصة بقياس مقاومة الملفين (X1 - X3) وللحصول على قيمة مقاومة الملف (X1 - X0) يتم قسمة القيمة المقاسة على (2) وكذلك الحال للحصول على مقاومة الملف (X3 - X0).



الشكل رقم (3-2-4)

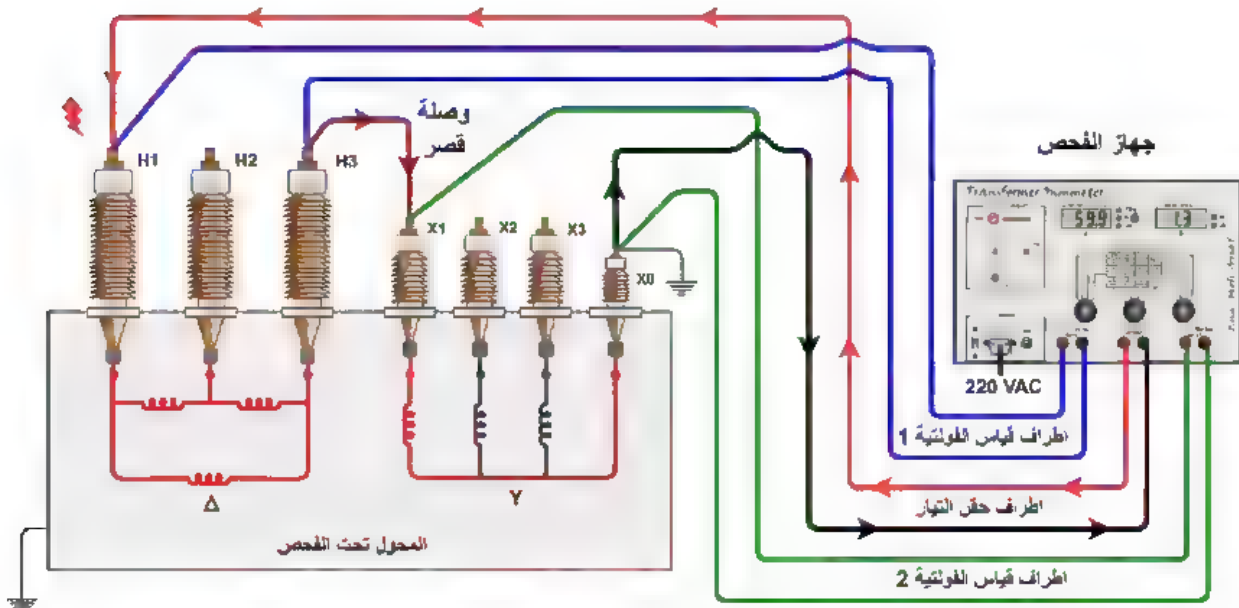
11.3 في حال كانت ملفات المحول المراد فحصها موصولة على شكل مثلث (Delta - Δ)، يُمكن تطبيق التوصيلة الموضحة في الشكل (3-2-5) والتي تبين التوصيلة الخاصة بقياس المقاومة المركبة لتوصيلة المثلث $(H1H3 // (H1H2 + H2H3))$ ، وللحصول على قيمة مقاومة الملف (H1 - H3) فقط يتم ضرب القيمة المقاسة بـ (1.5).



الشكل رقم (3-2-5)

11.4 في حال أردنا تطبيق الفحص باستخدام طريقة الـ (HV Assist) أو كما تُسمى بطريقة الـ Dual Windings) يُمكن تطبيق التوصيلة الموضحة في الشكل (3-2-6) والخاصة بمحول ذو مجموعة توصيل (Dyn5) كمثال، حيث يبين الشكل قياس مقاومة الملف (H1 - H3) و الملف (X1 - X0). (تم تلوين أسلاك التوصيل الخاصة بقياس الفولتية في الشكل التالي بالأزرق)

والأحضر لتمييزهما عن أسلاك حقن التيار ولتسهيل فهم التوصيلة، أما في الوقع فإن الأسلاك تكون ذات لون أسود وأحمر



الشكل رقم (3-2-6)

12. تشغيل جهاز الفحص عن طريق مفتاح التشغيل (ON) رقم (3)، و التأكد من إضاءة لمبة الإشارة التي تفيد الجاهزية (READY Indicator Lamp) رقم (4) الظاهرة في الشكل (3-2-2).
- 13 الضغط مطولاً على مفتاح بدء الفحص/التفريغ رقم (11) لأعلى أي على وضعية بدء الفحص (Initiate) والإستمرار بالضغط حتى تير لمبة الإشارة التحذيرية التي تفيد بحقن التيار (ON Warning Indicator Lamp) رقم (12) وبعد ذلك نتوقف عن الضغط.
- 14 ستظهر قيمة التيار كنسبة مئوية (%) على شاشة العرض (A) رقم (13) و بعد إستقرار هذه القيمة ستظهر قيمة مقاومة الملفات على شاشة العرض (B) رقم (14) الظاهرة في الشكل (3-2-2).

ملحوظة: أما في حال إستخدام طريقة الفحص الموصحة بالشكل (3-2-6) أو كما تُسمى بطريقة الـ (Dual winding) فإن نتيجة الفحص ستظهر على شاشتي العرض (A & B) لكل من الملفين تحت الفحص.



ملحوظة: للمحولات الصغيرة عادة ما يكون الزمن اللازم لثبات التيار بالثوابي والمحولات الكبيرة بالدقائق وللملفات الموصولة على شكل مثلث (Delta - Δ) أكثر قليلاً نظراً للتيارات الدوارة كما ورد في كُتَيْب التعليمات الخاص بهذا الجهاز [MEGGER, Manual AVTM830280 Rev.C]



15. بعد ثبات قيمة المقاومة الظاهرة على شاشة العرض (B) رقم (14)، يُمكن تغير وضعية مفتاح إختيار المدى رقم (5) (B) وذلك للتحكم ببطاق القراءات (Range) الظاهرة على الشاشة.

مثال: اذا أردت القيام بقياس مقاومة محول وكنت على علم مسبق (من الفحوصات الموقعية أو القصصية) أن قيمة المقاومة حوالي الـ (1.3 mΩ) فإنه بهذه الحالة يتم ضبط التيار على (50 mA) أو أكثر و نطاق القراءات الـ (Range) على (2 mΩ) كما هو مبين بالشكل السابق.

16. بعد الإنتهاء من الفحص يتم الضغط مطولاً على مفتاح بدء الفحص/التفريغ رقم (11) لأسفل أي على وضعية التفريغ (Discharge) لإيقاف الفحص والبدء بالتفريغ، بحيث يتم الإستمرار بالضغط حتى تنطفئ لمة الإشارة التحذيرية التي تفيد بحقن التيار (ON Warning Indicator Lamp) رقم (12) الظاهرة في الشكل (3-2-2) وبعد ذلك نتوقف عن الضغط.

17. نقوم بتكرار هذا الفحص على جميع الأطوار لملفات الجهد المرتفع والمنخفض.

ملحوظة: في حال تم فحص محول ذو مُعيّر خطوة (Tap-changer)، يجب إيقاف حقن التيار قبل تغيير وضعيته والإنتقال من خطوة لأخرى.

تحذير: بعد الإنتهاء من الفحص وتفريغ الطاقة المختزنة بالملفات قم بإزالة أسلاك التوصيل عن أطراف المحول قبل إرالتها عن جهاز الفحص.



الملحق (3-3)

تنويه

يضم هذا الملحق خطوات الفحص وتوصيلاته بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسّط. إستناداً على الخبرة بالتعامل مع هذه الأجهزة، وتَجَلُّر الإشارة أنه في حال إستخدام جهاز الفحص المُشار إليه في هذا الملحق لا يجب الإعتماد على هذا الملحق فقط، بل يجب قراءة الكُتبيات التفصيلية الخاصة بهذا الجهاز والمزودة بواسطة الشركة المُصنعة للجهاز جيداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية و السلامة العامة

فحص مقاومة ملفات المحول بإستخدام جهاز Transformer Ohmmeter MT0210 by MEGGER



الشكل رقم (3-3-1)

- مواصفات الجهاز: حسب ال(MEGGER MT0210 Data sheet)
 - قدرة المدخل : 120/240 V, 50/60 Hz, 720 VA :
 - نطاق تيار المخرج : 10 mA, 100 mA, 1 A, 10 A (dc) :
 - آلية تزويد التيار : توليد وتحكم إلكتروني.
 - فولتية فحص (OC) : 40 V (dc) :
 - فولتية القياسات : Up to 20 V (dc) :
 - مدخل قياس المقاومة : مدخلين منفصلين لقياس المقاومة في نفس الوقت.
 - الحماية : إغلاق تلقائي في حال حدوث أي قطع في أسلاك التوصيل أو فقدان لقدرة المدخل الخاصة بجهاز الفحص، وعمل تفريغ (Discharge) للطاقة المخزنة في المعدة تحت الفحص. بالإضافة لوجود حاصية إزالة المغنطة (De-magnetization) بعد الإنتهاء من الفحص.

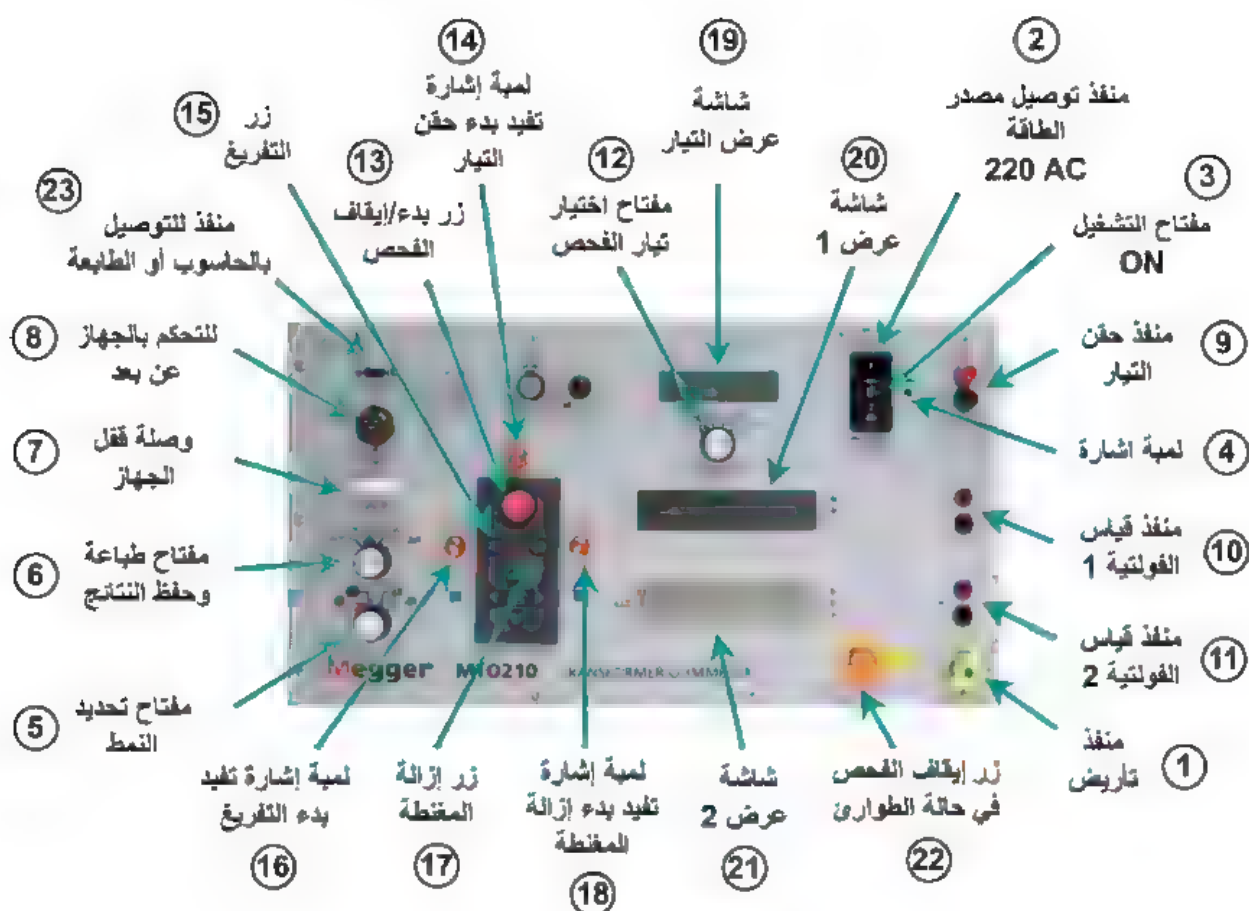
- الحماية من إرتفاع الحرارة : إغلاق تلقائي مع وجود لمبة إشارة تحذيرية عند تخطي حدود الحرارة المسموح بها لحماية جهاز الفحص.
- نطاق المقاومات المُقاسة : حسب الجدول التالي.

0.000001	10 $\mu\Omega$ to 0.2 Ω	10 A
0.0001	0.2 Ω to 2 Ω	10 A
0.00001	100 $\mu\Omega$ to 2 Ω	1 A
0.001	2 Ω to 20 Ω	1 A
0.0001	1 m Ω to 20 Ω	100 mA
0.01	20 Ω to 200 Ω	100 mA
0.001	10 m Ω to 200 Ω	10 mA
0.1	200 Ω to 2000 Ω	10 mA

- الدقة : $\pm 0.1\%$ Typical, $\pm 0.25\%$ Guaranteed :
- البيئة التشغيلية المحيطة : 14° F to 122° F (-10° C to 50° C) RH to 90%, Non condensing
- البيئة التخزينية المحيطة : -40 to 158° F (-40 to +70°C) :
- أبعاد الجهاز : 216 H x 546 W x 330 D mm :
- وزن الجهاز : Net 29 lb. (13.1 kg) :

• خطوات الفحص بواسطة هذا الجهاز:

1. التأكد من تطبيق الخطوات (6.1 إلى 6.8) الواردة في فقرة خطوات الفحص من فصل فحص مقاومة الملفات.
2. التأكد من أن الدائرة المُراد فحصها غير مُكهربة وعدم وجود احتمالية لكهربتها أثناء الفحص.
3. تجنب لمس دائرة الفحص أثناء إجراء الفحص أو بعده، إلا بعد التأكد من عدم وجود فولتية وأن الملفات تم تفريغها من الشحنات المخزنة تماماً.
4. التأكد من أن أسلاك التوصيل الخاصة بجهاز الفحص (Test leads) وكذلك المشابك الخاصة بها (Clamps) في حالة جيدة وغير متسخة ولا تعاني من أية أضرار فيزيائية كالشقوق أو الكسور.
5. التأكد من أن جهاز الفحص المُراد استخدامه مُعاير (Calibrated).
6. قبل البدء بالفحص يُفضّل التعرف على أجزاء الواجهة الرئيسية للجهاز من شاشة ومنافذ وأزرار ومفاتيح تحكم ولمبات إشارة كما هو مُبين بالشكل (3-3-2).

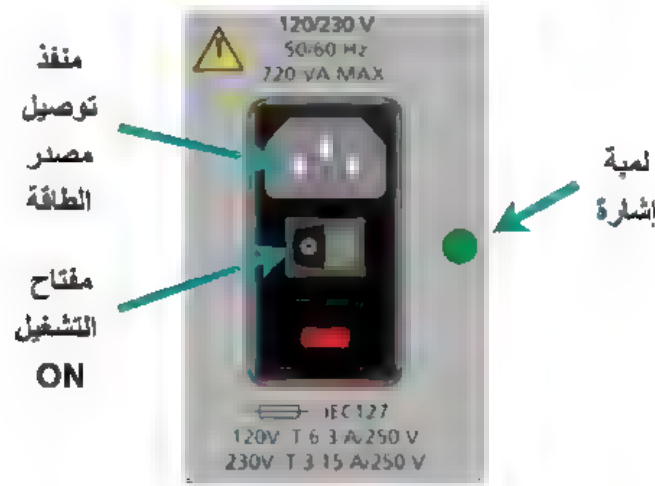


الشكل رقم (2-3-3)

7. تهيئة منطقة الفحص عبر مراعاة الأمور التالية:
 - 7.1 التأكد من أن منطقة الفحص جافة قدر الإمكان.
 - 7.2 التأكد من عدم وجود مواد قابلة للإشتعال في منطقة الفحص.
 - 7.3 التأكد من التهوية الجيدة لمنطقة الفحص فيما إذا كانت مغلقة.
 - 7.4 التأكد من سلامة نظام التأريض في منطقة الفحص.
 - 7.5 وضع حواجز حول منطقة الفحص وشواخص تفيد بوجود فحص ذو فولتية وتيار خطير.
8. إحضار جهاز الفحص (MTO210) إلى الموقع مع مراعاة وضع الجهاز بالظل وعدم تعريضه لأشعة الشمس المباشرة لوقت طويل، حيث أن الحرارة التشغيلية للجهاز يجب ألا تزيد عن (50°) درجة مئوية.
9. وصل جهاز الفحص بالأرض (Local station earth) عبر منفذ التأريض (Wing Nut) رقم (1) في الشكل السابق بواسطة الكيبل المؤود مع الجهاز من قِتل الشركة المُصنَّعة (4.5m) متر.
10. التأكد من أن خزان المحول موصول بالأرض (Local station earth) عبر مسار تأريض ذو معاوقة قليلة (Low Impedance).
11. التأكد من أن كيبل الأرضي لمصدر الطاقة الكهربائي الخاص بجهاز الفحص موصول بالأرض (Local station earth) بمعاوقة (Impedance) تقلّ عن (100mohms) ملي أوم.
12. توصيل جهاز الفحص بمصدر الطاقة الكهربائية عبر المنفذ (2) المبين في الشكل (2-3-3).

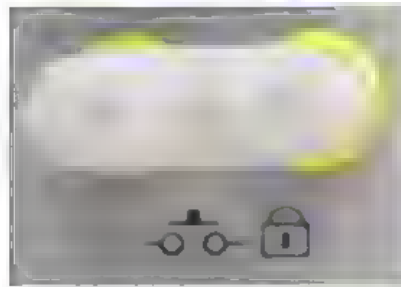
13. التأكد من وضعية المفاتيح كالآتي:

13.1 مفتاح التشغيل رقم (3) في الشكل (3-3-2) على وضعية (OFF - 0) كما هو موضح في الشكل (3-3-3)



الشكل رقم (3-3-3)

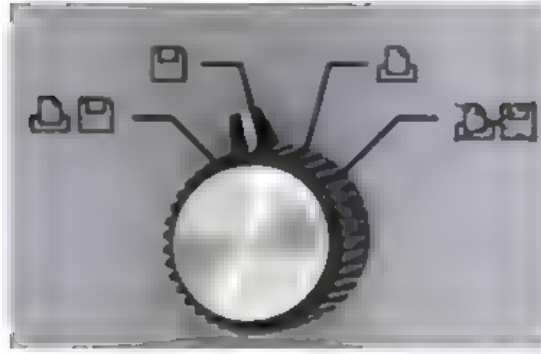
13.2 وصلة قفل الجهاز رقم (7) في الشكل (3-3-2) يجب أن تكون مغلقة بواسطة (Jumper) كما هو مبين في الشكل (3-3-4) في حال عدم إستخدام إي إشارة خارجية لإيقاف الفحص أو منع تشغيله، وفي حال فتح هذه الوصلة يظهر على شاشة العرض 1 كلمة (IntLoc) والتي تفيد بقفل جهاز الفحص.



الشكل رقم (3-3-4)

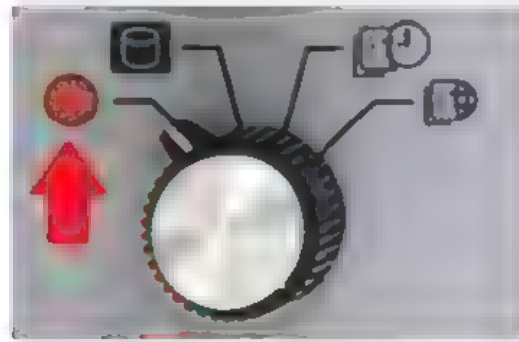
13.3 مفتاح طباعة وحفظ النتائج رقم (6) في الشكل (3-3-2) نقوم بإختيار واحدة من الوضعيات التالية والمبينة في الشكل (3-3-5):

- ✓ وضعية طباعة وحفظ نتائج الفحص (Print and Save Data).
- ✓ وضعية حفظ النتائج فقط (Save Data).
- ✓ وضعية طباعة النتائج فقط (Print Data).
- ✓ وضعية عرض النتائج على الشاشة فقط (Just Display Data).



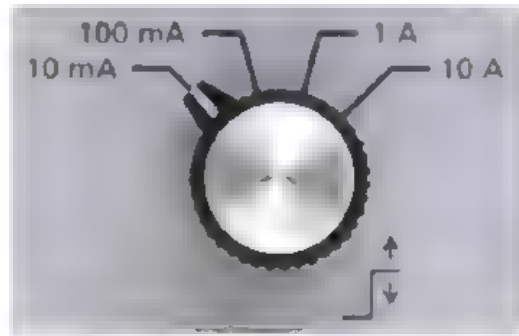
الشكل رقم (3-3-5)

13.4 مفتاح تحديد النمط رقم (5) في الشكل (3-3-2)، نقوم بإختيار وضعية الفحص (Test Mode) المُشار إليها في الشكل (3-3-6).



الشكل رقم (3-3-6)

13.5 مفتاح إختيار التيار رقم (12) في الشكل (3-3-2)، يتم من خلاله تحديد قيمة تيار الفحص المُراد حقنه (10mA, 100mA, 1A, 10A) وفقاً لقيمة مقاومة الملفات المُراد قياسها وقيمة التيار الإسمي لهذه الملفات كما هو مبين في الشكل (3-3-7).



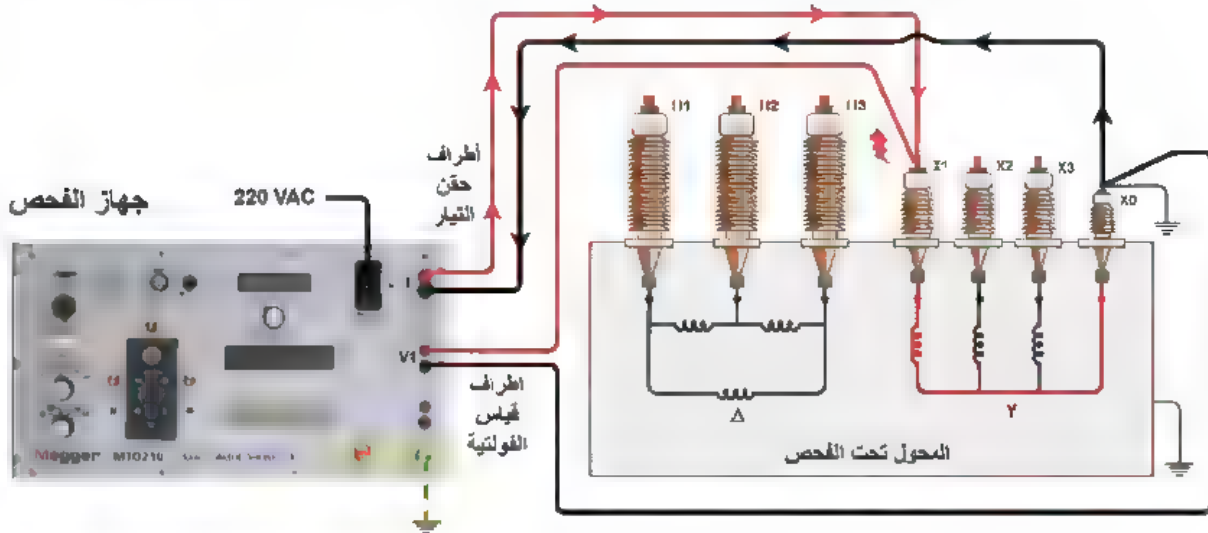
الشكل رقم (3-3-7)

14 وصل زوج الأسلاك الخاص بحقن التيار على المنفذ رقم (9) في الشكل (3-3-2). (على جهاز الفحص فقط، لا على المحول)

15 وصل زوج الأسلاك الخاص بقياس الفولتية على المنفذ رقم (10) في الشكل (3-3-2). (على جهاز الفحص فقط، لا على المحول)

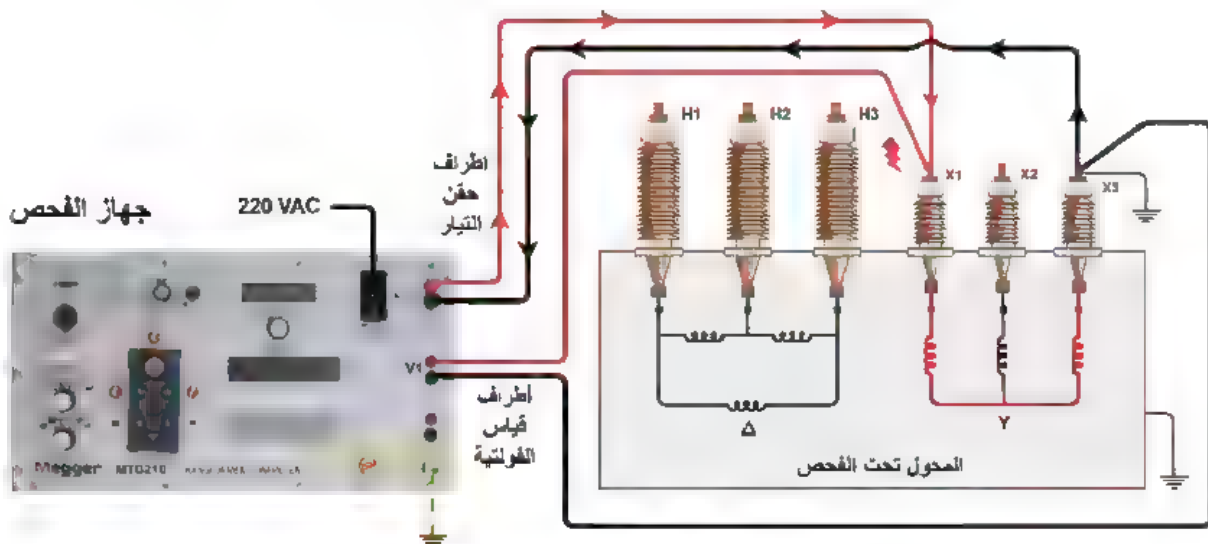
16. عمل توصيلة الفحص (توصيل الأسلاك بالمحول) وفقاً لنوع الملفات المُراد فحصها كالآتي:

16.1 في حال كانت ملفات المحول المُراد فحصها موصولة على شكل نجمة (Star - Y) مع إمكانية الوصول إلى نقطة التعادل (Accessible Neutral Point)، يُمكن تطبيق التوصيلة الموضحة في الشكل (3-3-8) والتي تبين التوصيلة الخاصة بقياس مقاومة الملف (X1 - X0).



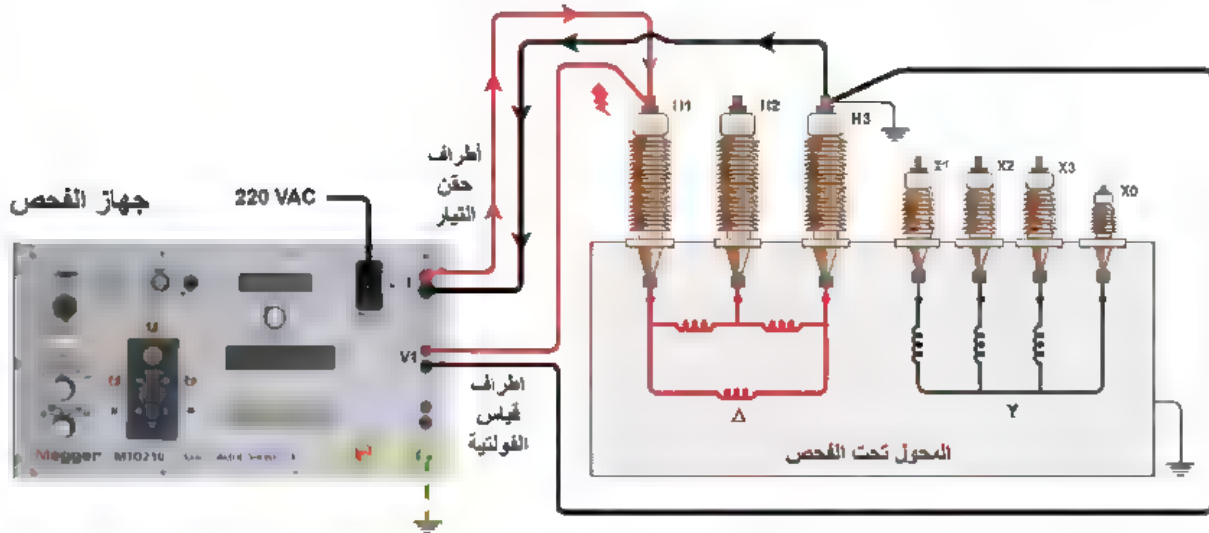
الشكل رقم (3-3-8)

16.2 في حال كانت ملفات المحول المُراد فحصها موصولة على شكل نجمة (Star - Y) مع عدم إمكانية الوصول إلى نقطة التعادل (Not Accessible Neutral Point)، يُمكن تطبيق التوصيلة الموضحة في الشكل (3-3-9) والتي تبين التوصيلة الخاصة بقياس مقاومة الملفين (X1 - X3)، وللحصول على قيمة مقاومة الملف (X1 - X0) يتم قسمة القيمة المُقاسة على (2) وكذلك الحال للحصول على مقاومة الملف (X3 - X0).



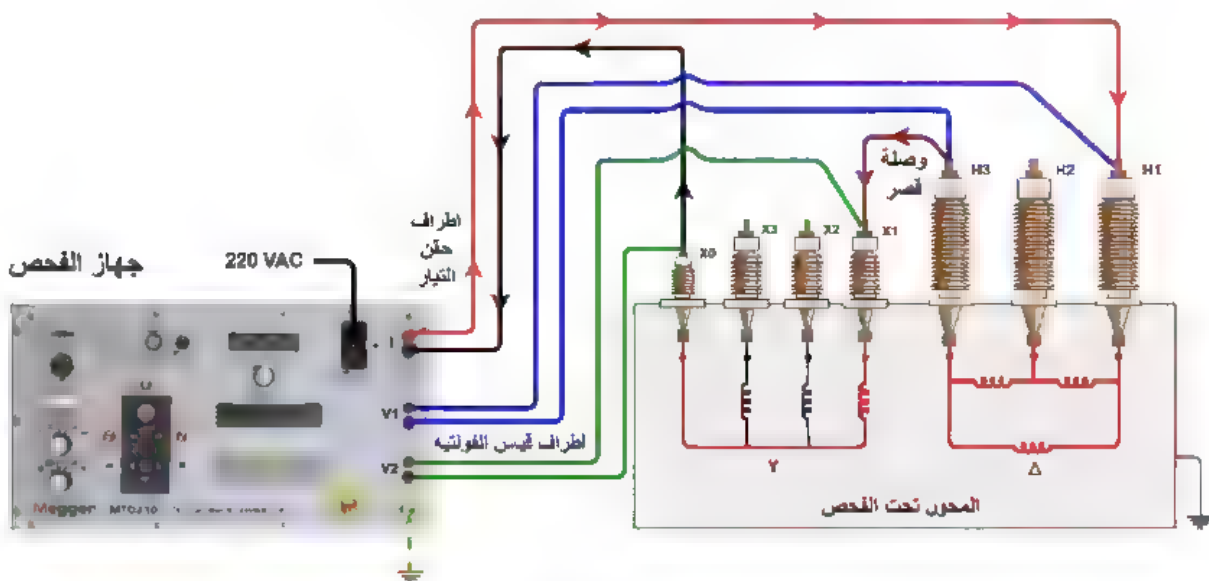
الشكل رقم (3-3-9)

16.3 في حال كانت ملفات المحول المراد فحصها موصولة على شكل مثلث (Δ - Delta)، يُمكن تطبيق التوصيلة الموضحة في الشكل (3-3-10) والتي تبين التوصيلة الخاصة بقياس المقاومة المركبة لتوصيلة المثلث ($H1H3/(H1H2+H2H3)$)، وللحصول على قيمة مقاومة الملف ($H1 - H3$) فقط يتم ضرب القيمة المُقاسة بـ (1.5).



الشكل رقم (3-3-10)

16.4 في حال أردنا تطبيق الفحص باستخدام طريقة الـ (HV Assist) أو كما تُسمى بطريقة الـ (Dual Windings) يُمكن تطبيق التوصيلة الموضحة في الشكل (3-3-11) والخاصة بمحول ذو مجموعة توصيل (Dyn5) كمثال، حيث يبين الشكل قياس مقاومة الملف ($H1 - H3$) و الملف ($X1 - X0$). (تم تلوين أسلاك التوصيل الخاصة بقياس العولتية في الشكل التالي بالأزرق والأخضر لتمييزهما عن أسلاك حقن التيار ولتسهيل فهم التوصيلة، أما في الواقع فإن الأسلاك تكون ذات لون أسود وأحمر)



الشكل رقم (3-3-11)

17. تشغيل جهاز الفحص عن طريق مفتاح التشغيل (ON) رقم (3) والمدمج مع منفذ توصيل مصدر الفولتية في الـ (AC input power module)، و التأكد من إضاءة لمبة الإشارة خضراء اللون رقم (4) في الشكل (3-3-2) التي تفيد الجاهزية.
18. التأكد من عدم وجود أية مشاكل في جهاز الفحص نفسه، فعند التشغيل يقوم جهاز الفحص بعمل فحص ذاتي (Self-test) وإظهار رسائل تفيد بوجود مشاكل في الجهاز إن وجدت.
19. ملاحظة ظهور كلمة (READY) على شاشة عرض التيار رقم (19) و ظهور درجة حرارة الجو عند الفحص على شاشة العرض 1 رقم (20) بحيث يُمكن تغيير قيمة هذه الحرارة باستخدام الأسهم لأعلى وأسفل.
20. الضغط على زر بدء الفحص رقم (13) و بعدها سَتُنير لمبة الإشارة التحذيرية رقم (14) والتي تفيد بدأ حقن التيار، في هذه الأثناء ستظهر قيمة التيار المحقون في الملفات على شاشة عرض التيار رقم (19) ويظهر عداد الثواني على شاشة العرض 1 رقم (20) و بعد ثبات التيار يختفي عداد الثواني وتظهر قيمة مقاومة الملفات.
21. يُمكن الضغط على زر بدء الفحص رقم (13) لإيقاف حقن التيار و بدء التفريغ أو يُمكن إيقاف الفحص وبدأ التفريغ بالضغط على زر التفريغ رقم (15) مباشرة حيث ستُنير لمبة الإشارة رقم (16) بشكل متقطع لتفيد بأن عملية التفريغ قيد العمل ومن ثم تنطفأ بشكل كامل عند إنتهاء التفريغ.
22. بعد الإنتهاء من عملية التفريغ يُمكن نقل أسلاك التوصيل بحذر للملفات الأخرى المُراد قياس مقاومتها.
23. نقوم بتكرار هذا الفحص على جميع الأطوار لملفات الجهد المرتفع والمنخفض.
24. بعد الإنتهاء من الفحص بشكل نهائي أي على جميع الملفات والأطوار يُمكن عمل إزالة لمغنتة القلب الحديدي (Core De-magnetization) عبر الضغط على زر إزالة المغنتة رقم (17) وملاحظة إنارة لمبة الإشارة رقم (18) لحين إنتها إزالة المغنتة.

ملحوظة: للمحولات الصغيرة عادة ما يكون الزمن اللازم لثبات التيار بالثواني وللمحولات الكبيرة بالدقائق وللملفات الموصولة على شكل مثلث (Δ - Delta) أكثر قليلاً نظراً للتيارات الدوارة كما ورد في كُتيب التعليمات الخاص بهذا الجهاز [MEGGER, AVTM830280 Rev.C]



ملحوظة: في حال تم فحص محول ذو مُغَيِّر خطوة (Tap-changer)، يجب إيقاف حقن التيار قبل تغيير وضعيته والانتقال من خطوة لأخرى.



تحذير: في حال أردت إيقاف الفحص لأسباب طارئة يُمكن الضغط على زر إيقاف الفحص في حالة الطوارئ (Emergency Push button) رقم (22) في الشكل (3-3-2) لإيقاف الفحص وبدء عملية التفريغ تلقائياً.



الملحق (4-3)

تنويه

يضم هذا الملحق خطوات الفحص وتوصيلاته بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسّط. إستناداً على الخبرة بالتعامل مع هذه الأجهزة، وتُجدر الإشارة أنه في حال إستخدام جهاز الفحص المُشار إليه في هذا الملحق لا يجب الإعتماد على هذا الملحق فقط، بل يجب قراءة الكُتيبات التفصيلية الخاصة بهذا الجهاز والمزودة بواسطة الشركة المُصنعة للجهاز جيداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية و السلامة العامة

فحص مقاومة ملفات المحول بإستخدام جهاز TESTRANO 600 by OMICRON



الشكل رقم (1-4-3)

• مواصفات الجهاز: حسب الـ (TESTRANO600 Brochure)

- فولتية المدخل الاسمية : 100/240 V, 50/60 Hz
- فولتية المدخل المسموح بها : 85-264 V, 45-65 Hz
- نطاق تيار/فولتية المخرج : حسب الجدول التالي.

عدد الأطوار	نطاق التيار (dc)	الفولتية القصوى (dc)
ثلاثي الأطوار	0 ... ±33 A	56 V
	0 ... ±16 A	113 V
آحادي الطور	0 ... ±100 A	56 V
	0 ... ±33 A	170 V
	0 ... ±50 A	113 V
	0 ... ±16 A	340 V

نطاق المقاومات المُقاسة : حسب الجدول التالي.

التيار (dc)	نطاق المقاومة	دقة القراءات
3 A	10 ... 100 Ω	0.1%
	1 ... 10 Ω	0.1%
	0.1 ... 1 Ω	0.1%
30 A	1 ... 10 Ω	0.037%
	0.1 ... 1 Ω	0.04%
	0.01 ... 0.1 Ω	0.033%
	0.001 ... 0.01 Ω	0.037%
	0.0001 ... 0.001 Ω	0.05%
100 A	3 ... 30 m Ω	0.033%
	300 ... 3000 $\mu\Omega$	0.037%
	30 ... 300 $\mu\Omega$	0.05%
	3 ... 30 $\mu\Omega$	0.07%

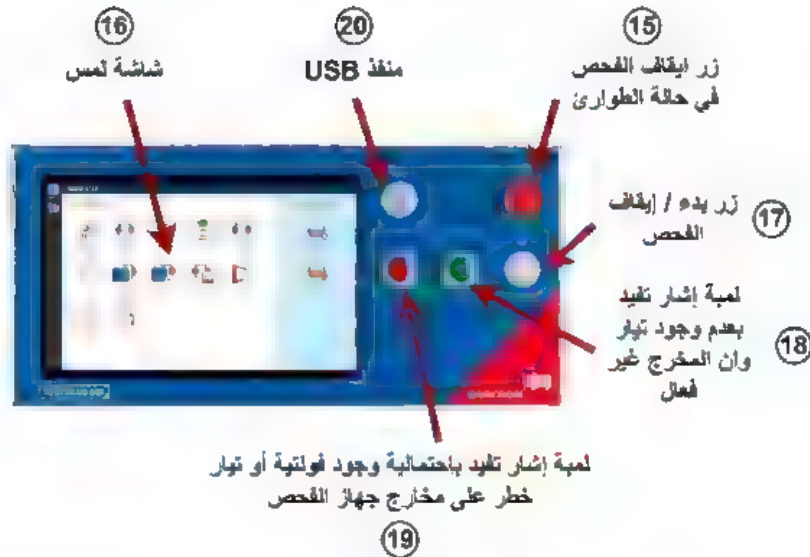
- البيئة التشغيلية المحيطة : 14° F to 131° F (-10° C to 55° C) RH to 95%, Non condensing
- البيئة التخزينية المحيطة : -22 to 158° F (-30 to +70°C)
- أبعاد الجهاز : 580 x 386 x 229 mm
- وزن الجهاز : 45.5 lb. (20.6 kg), with display

• خطوات الفحص بواسطة هذا الجهاز:

1. التأكد من تطبيق الخطوات (6.1 إلى 6.8) الواردة في فقرة خطوات الفحص من فصل فحص مقاومة الملفات.
2. التأكد من أن الدائرة المراد فحصها غير مُكهربة وعدم وجود احتمالية لكهربتها أثناء الفحص.
3. تجنب لمس دائرة الفحص أثناء إجراء الفحص أو بعده، إلا بعد التأكد من عدم وجود فولتية وأن الملفات تم تفريغها من الشحنات المخزنة تماماً.
4. التأكد من أن أسلاك التوصيل الخاصة بجهاز الفحص (Test leads) وكذلك المشابك الخاصة بها (Clamps) في حالة جيدة وغير متسخة ولا تعاني من أية أضرار فيزيائية كالشقوق أو الكسور.
5. التأكد من أن جهاز الفحص المراد استخدامه مُعاير (Calibrated).
6. قبل البدء بالفحص يُفصل التعريف على أجزاء جهاز الفحص من شاشة ومفاذ وأررار ومفاتيح تحكم ولمبات إشارة كما هو مُبين بالأشكال (3-4-2&3).



الشكل رقم (2-4-3)



الشكل رقم (3-4-3)


7. تهيئة منطقة الفحص عبر مراعاة الأمور التالية:

- 7.1 التأكد من أن منطقة الفحص جافة قدر الإمكان.
 - 7.2 التأكد من عدم وجود مواد قابلة للإشتعال في منطقة الفحص.
 - 7.3 التأكد من التهوية الجيدة لمنطقة الفحص فيما إذا كانت مغلقة.
 - 7.4 التأكد من سلامة نظام التاريض في منطقة الفحص.
 - 7.5 وضع حواجز حول منطقة الفحص وشواخص تفيد بوجود فحص ذو فولتية وتيار خطير.
- 8 إحضار جهاز الفحص (TESTRANO 600) إلى الموقع مع مراعاة وضع الجهاز بالظل وعدم تعريضه لأشعة الشمس المباشرة لوقت طويل، حيث أن الحرارة التشغيلية للجهاز يجب ألا تزيد عن (55°)

- درجة مئوية، وفي حال كانت الحرارة أكثر من (40°) درجة مئوية يجب الرجوع للكتيب التفصيلي (Manual) الخاص بجهاز الفحص لمعرفة التيار الأقصى الذي يُمكن حقنه من خلال الجهاز، وكذلك مراعاة جفاف أجزاء الجهاز جميعها قبل تشغيله.
9. التأكد من أن مفتاح التشغيل الخاص بجهاز الفحص رقم (3) في الشكل (3-4-2) على وضعية (OFF - 0) الموضحة على المفتاح.
10. التأكد من ضغط زر إيقاف الفحص في حالات الطوارئ (Emergency Push Button) رقم (15) في الشكل (3-4-3).
11. وصل جهاز الفحص بالأرض (Local station earth) عبر منفذ التأريض رقم (1) في الشكل (3-4-2) بواسطة الكيبل المُوَزَّد مع الجهاز من قِبَل الشركة المُصنَّعة أو بواسطة كيبل تأريض لا يقل مساحة مقطعه العرضي عن (6 mm²) ملي متر مربع أقرب ما يُمكن على مُشغل الجهاز لتقليل معاوقة التأريض (Impedance) قدر المستطاع.
12. التأكد من أن خزان المحلول موصول بالأرض (Local station earth) عبر مسار تأريض ذو معاوقة قليلة (Low Impedance).
13. التأكد من أن كيبل الأرضي لمصدر الطاقة الكهربائي الخاص بجهاز الفحص موصول بالأرض (Local station earth) بمعاوقة قليلة (Low Impedance).
14. توصيل جهاز الفحص بمصدر الطاقة الكهربائية عبر المنفذ رقم (2) في الشكل (3-4-2).
15. تشغيل الجهاز بواسطة مفتاح التشغيل رقم (3) في الشكل (3-4-2) عن طريق تعير وضعيته من (0) لـ (I) الموضحة على المفتاح.
16. ملاحظة إنارة كل من لمبة الإشارة حمراء اللون رقم (18) والحلقة الرقواء حول زر بدء/إيقاف الفحص (Start/Stop) في الشكل (3-4-3) وهذا يعني أن الجهاز لا يحق تيار ولا فولتية كما يظهر في الشكل (3-4-4).



الشكل رقم (3-4-4)

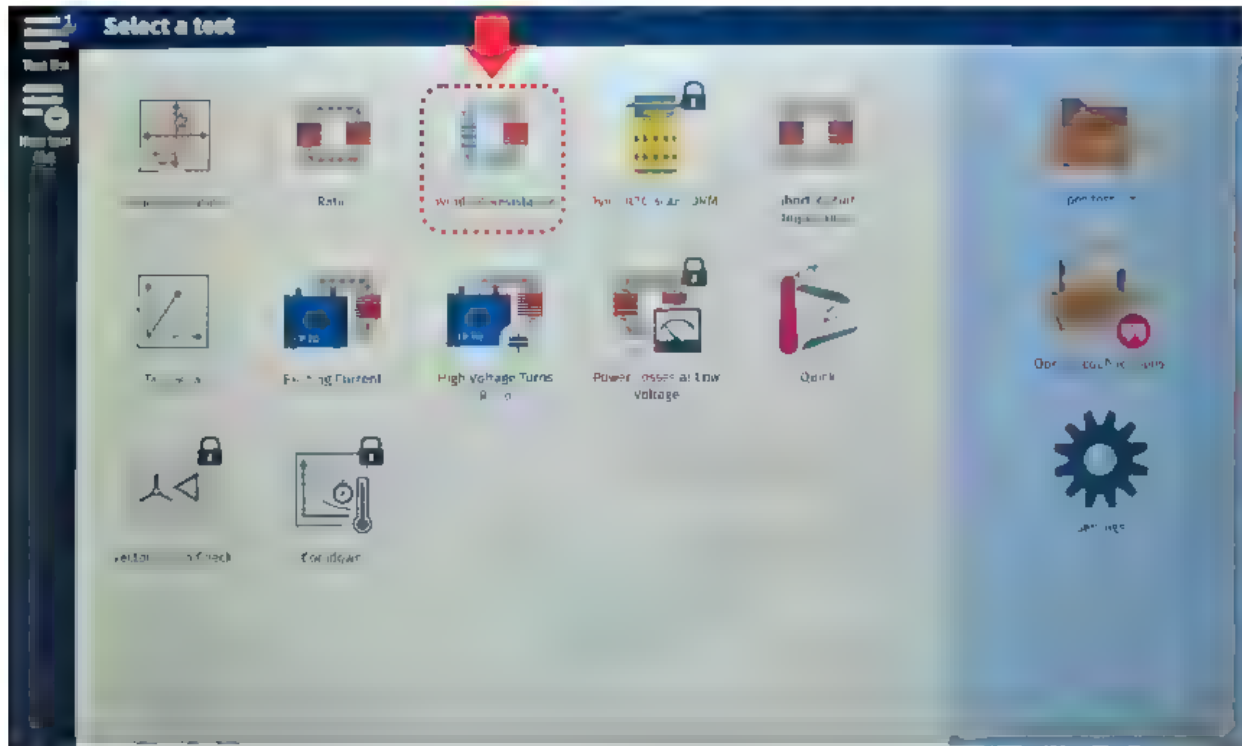
17. في حال كان هالك مشكلة ما في التأريض سوف تظهر رسالة على الشاشة تفيد بذلك وستظهر العلامة التالية أسفل الشاشة ، وفي حال عدم إنارة أي ضوء تحديري أو ظهور أية رسائل

تحذيرية على الشاشة فإن ذلك يعني أن الأرضي والجهاز سليمين والحهار مُهيأ لعمل باقي التوصيلات والبدء بالفحص.


ملحوظة: يُتيح جهاز الفحص (TESTRANO 600) إمكانية ضبط إعدادات الفحص و إجراؤه بطريقتين، الطريقة الأولى بواسطة شاشة اللمس (Touch Control) مباشرة والطريقة الثانية بواسطة توصيل جهاز الحاسوب بجهاز الفحص (TESTRANO 600) والقيام بالفحص عبر برنامج (Primary Test Manger - PTM). حيث سيتم التطرُّق للطريقة الأولى فقط في هذا الملحق.

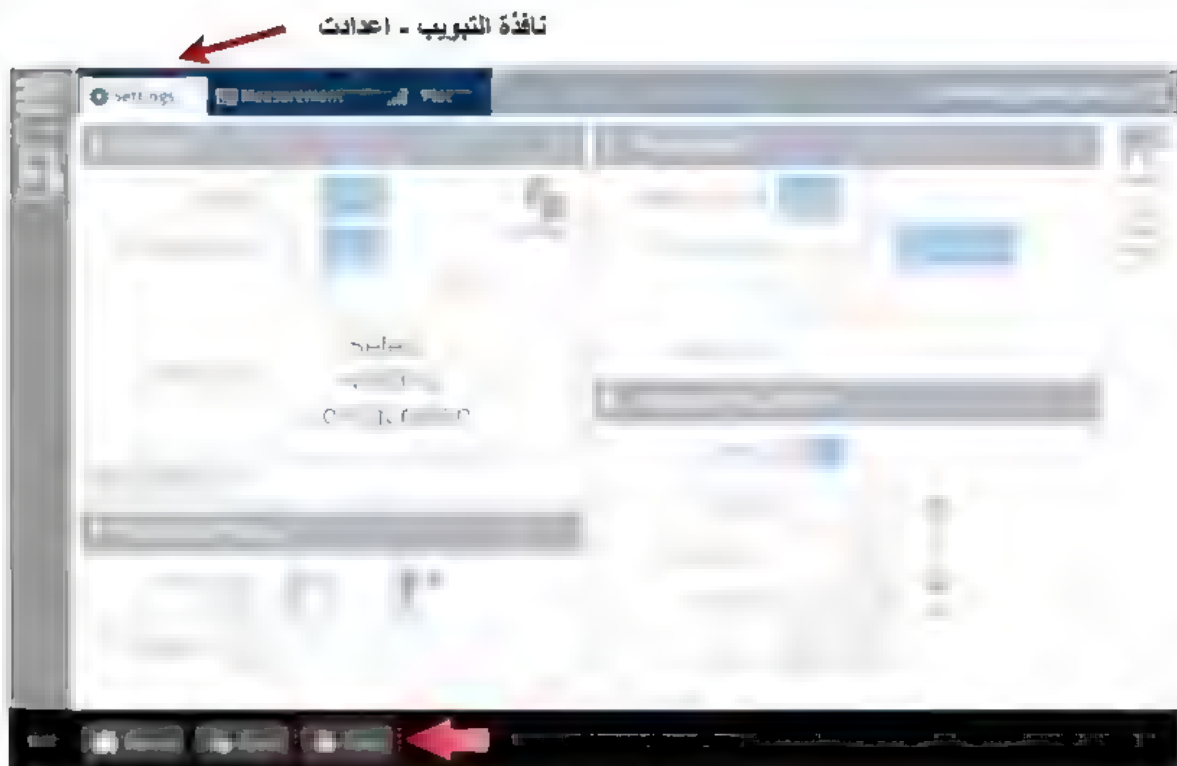


18. إختيار فحص مقاومة الملفات (Winding Resistance) من القائمة الرئيسية الظاهرة على شاشة اللمس (Touch Control) والمُبيّنة في الشكل (3-4-5).



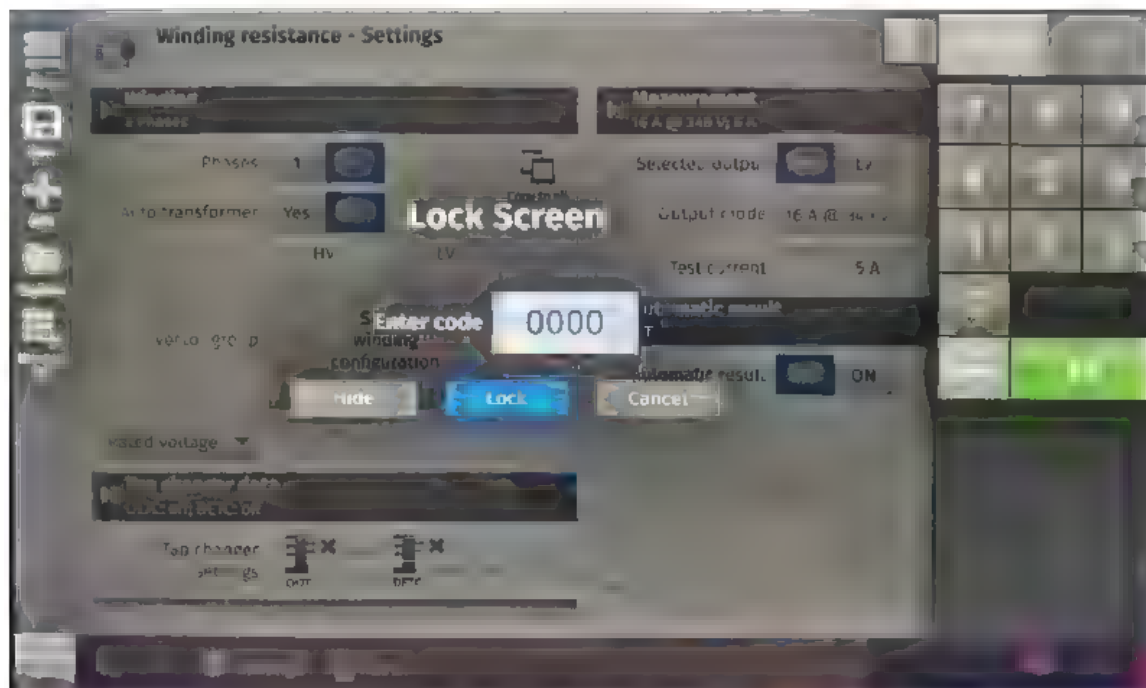
الشكل رقم (3-4-5)

19. بعد ذلك تظهر الشاشة المُبيّنة في الشكل (3-4-6) وتكون بالبداية على نافذة التوبيب إعدادات (Settings). نقوم بعمل قفل (Software Lock) للحفاظ على الوضعية الآمنة أثناء عمل التوصيلة المناسبة للفحص، وذلك بالضغط على زر القفل الظاهر أسفل الشاشة  كما هو مُبين في الشكل (3-4-6).



الشكل رقم (3-4-6)

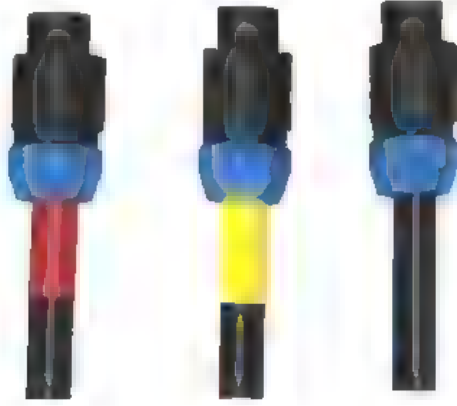
20. بعد الضغط على زر القفل (Lock) المبين في الشكل السابق تظهر النافذة الفرعية المبينة في الشكل (3-4-7)، ثم نقوم بإدخال كود رباعي والصغط على كلمة (Lock). وبذلك نكون قد وصلنا للوضعية الآمنة للجهاز.



الشكل رقم (3-4-7)

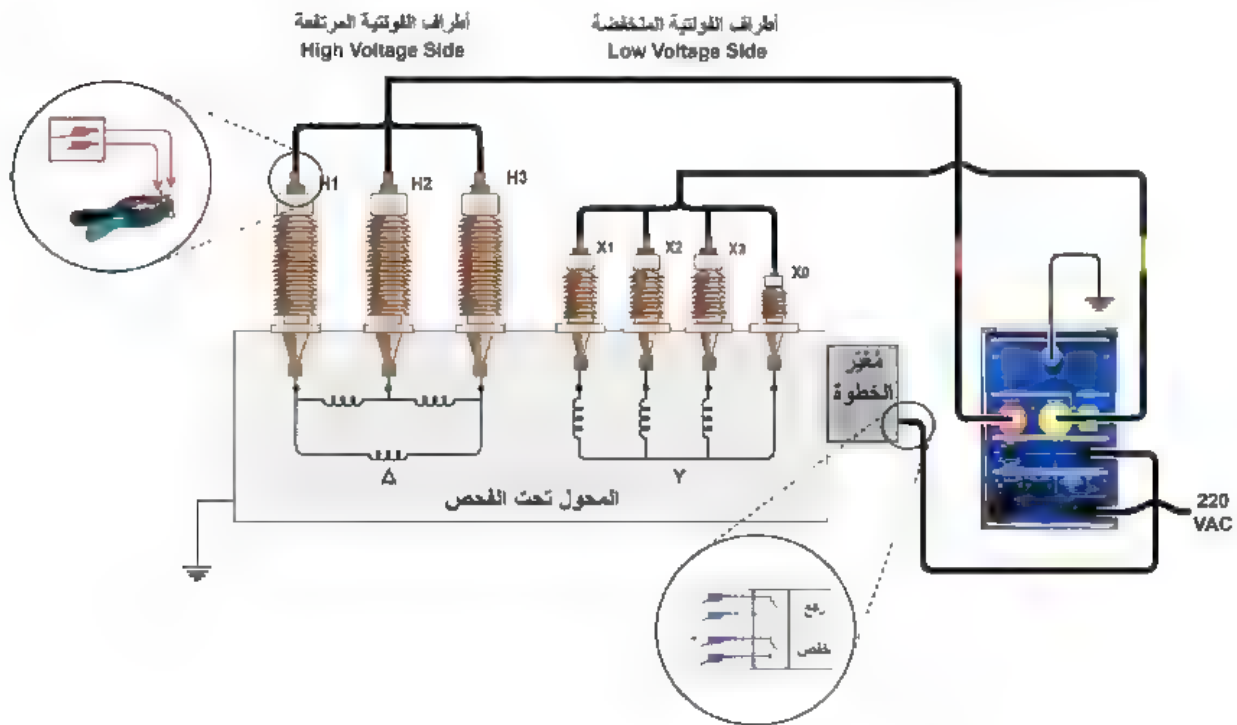
21. توصيل الكوابل الظاهرة في الشكل (3-4-8) بجهاز الفحص عبر المنافذ المبينة في الشكل (3-4-2) كالآتي:

- 21.1 توصيل كابل الفولتية المرتفعة (الأحمر) بالمنفذ رقم (4) المُبين في الشكل (3-4-2).
- 21.2 توصيل كابل الفولتية المنخفضة (الأصفر) بالمنفذ رقم (9) المُبين في الشكل (3-4-2).
- 21.3 توصيل كابل مُعَيِّر الخطوة (الأسود) بالمنفذ رقم (7) المُبين في الشكل (3-4-2).



الشكل رقم (3-4-8)


22. توصيل كوابل جهاز الفحص بالمحول وفقاً للتوصيلة المبينة بالشكل (3-4-9).



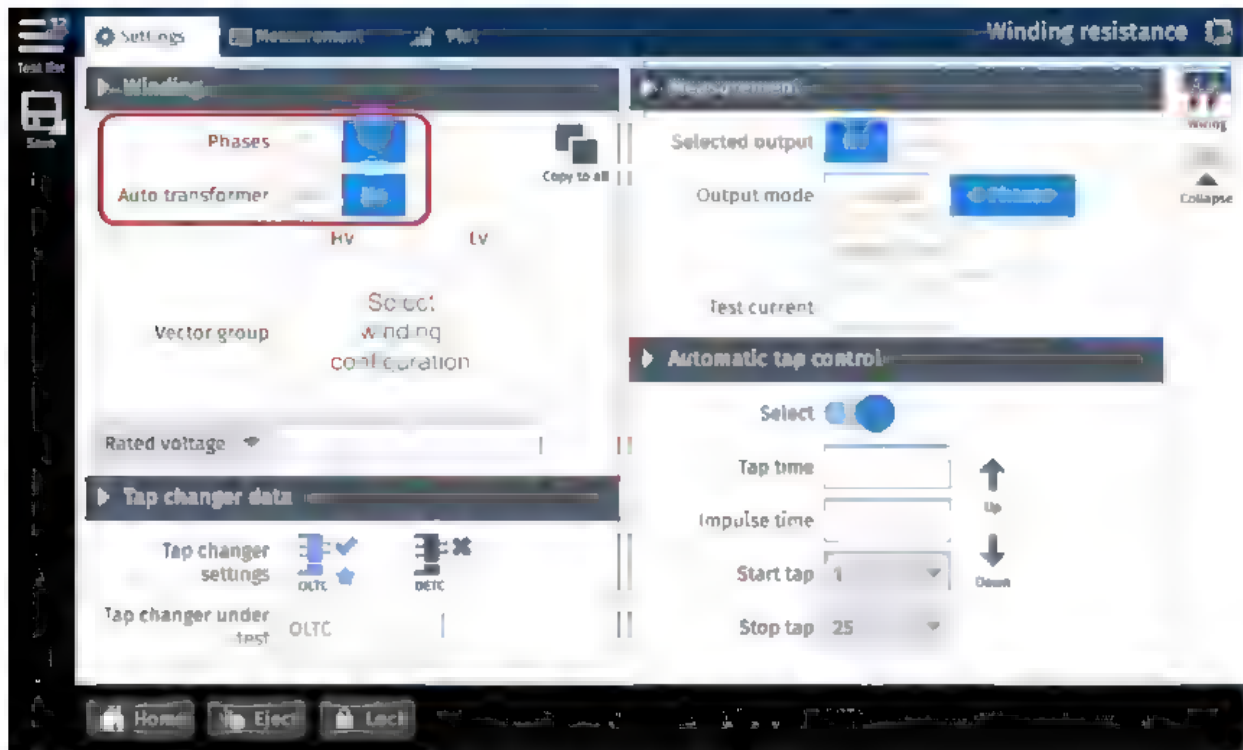
الشكل رقم (3-4-9)

- 23. إرجاع الطاقة الكهربائية لمُغَيِّر الخطوة (Tap-changer) فيما إذا كانت معصولة.
- 24. التأكد من نصب حواجز السلامة بالإضافة للشواخص التحذيرية

25. بعد الإنتهاء من التوصيلة كاملة، نقوم بتحرير (Release) زر إيقاف الفحص في حالة الطوارئ (Emergency Stop Button).

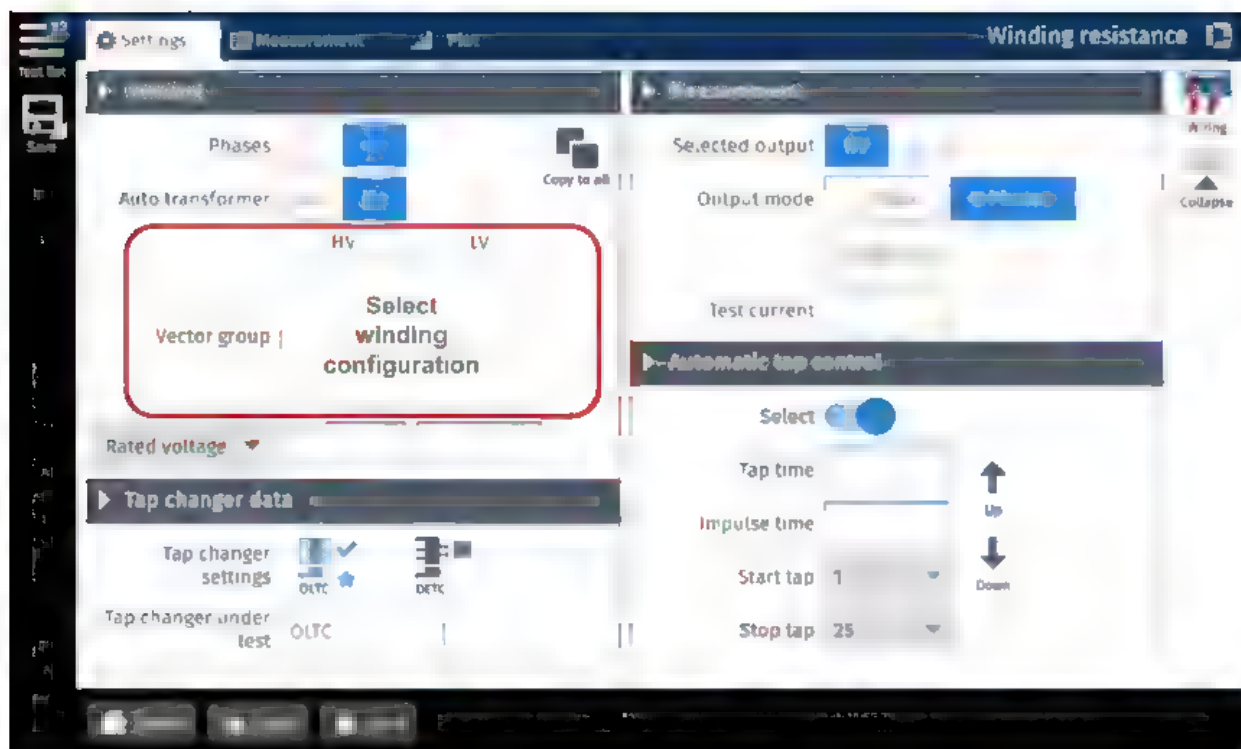
26. الرجوع لشاشة اللمس وإزالة قفل الشاشة عبر إدخال الكود الرباعي والضغط على أيقونة الإدخال  ويمكن كذلك إزالة قفل الشاشة عبر إطفاء الجهاز وتشغيله مرة أخرى.

27. من الشاشة الظاهرة في الشكل (3-4-10) والتي تكون بالبداية على نافذة التيويب إعدادات (Settings) يتم تحديد عدد أطوار المحول المُراد فحصه بالضغط على الرقم (3) أي أنه ثلاثي الطور (3 phase transformer)، ثم يتم الضغط على (No) بجانب المحول التلقائي (Auto Transformer).



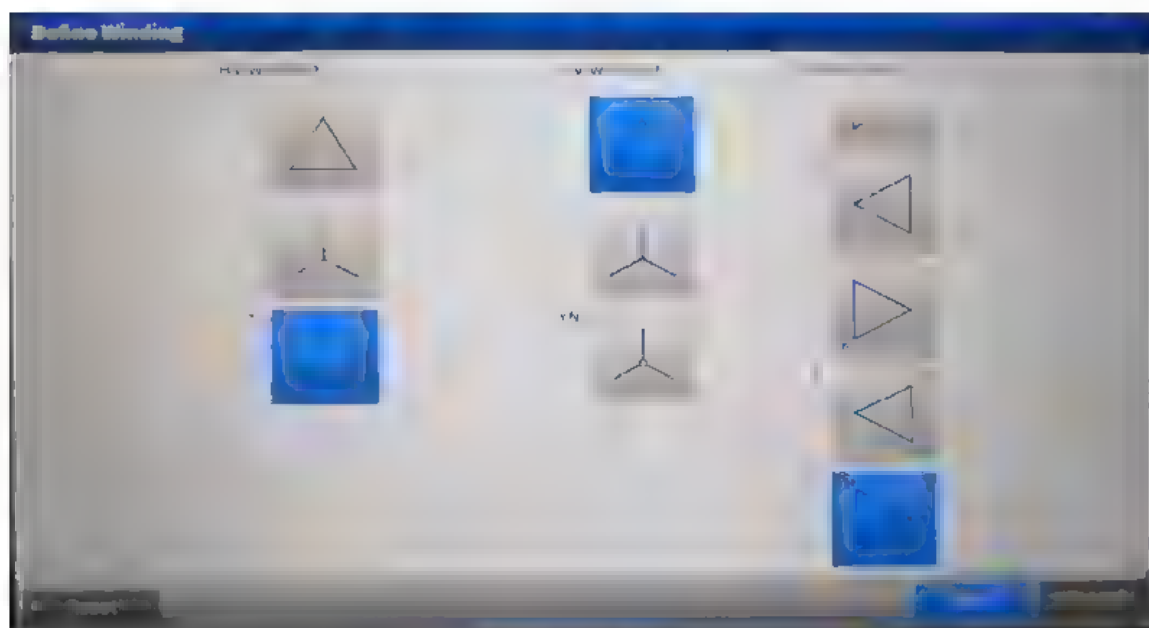
الشكل رقم (3-4-10)

28. تحديد مجموعة التوصيل (Vector group) الخاصة بالمحول المُراد فحصه وذلك بالضغط على جملة إختار مجموعة التوصيل (Select winding configuration) الظاهرة على الشاشة والمُبيّنة في الشكل (3-4-11) لتظهر لنا شاشة تحديد مجموعة التوصيل.



الشكل رقم (3-4-11)

29. من شاشة تحديد مجموعة التوصيل الظاهرة في الشكل (3-4-12) نقوم بتحديد مجموعة التوصيل الخاصة بالمحول الفراد فحصه، حيث تم تحديد المجموعة (YNd11) كمثال ثم الضغط على زر حفظ (Save).



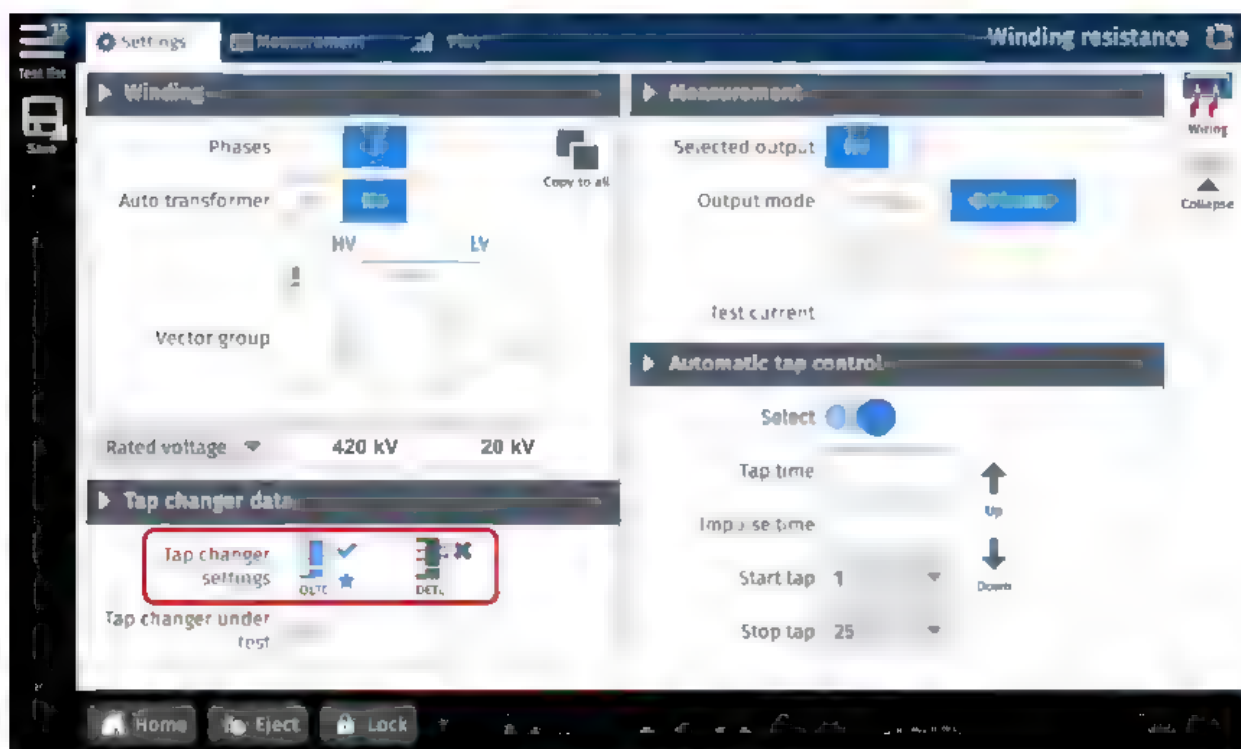
الشكل رقم (3-4-12)

30. تحديد الفولتية الإسمية للمحول الفراد فحصه وذلك بإدخال قيمة هذه الفولتية بالمكان المخصص لها كما هو مبين بالشكل (3-4-13).



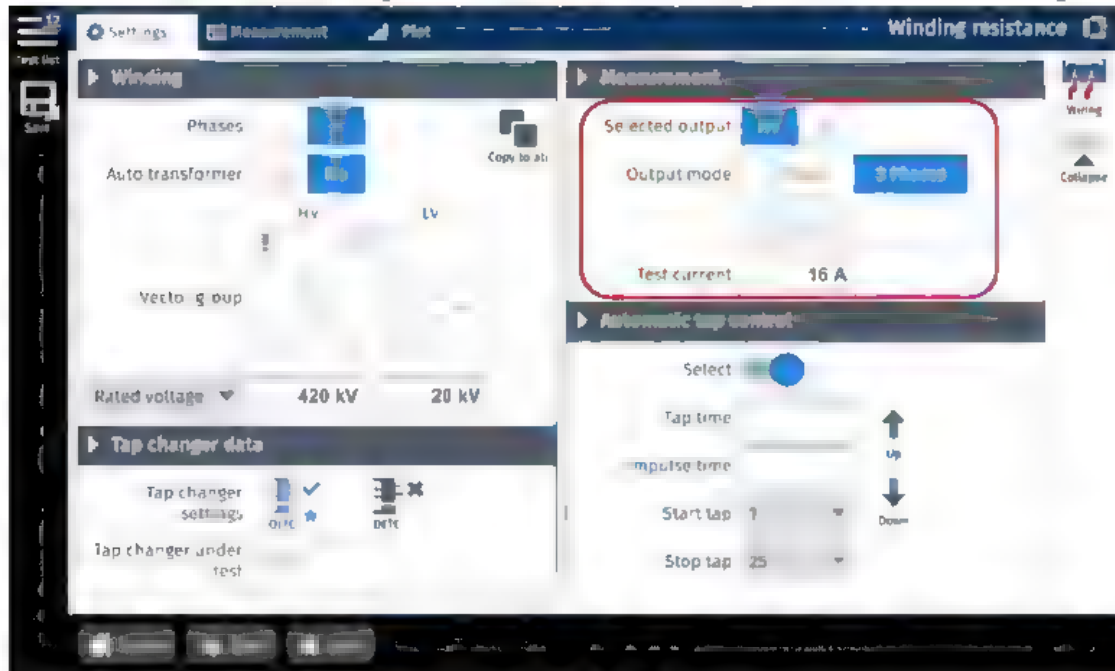
الشكل رقم (3-4-13)

31. تحديد نوع مُغيّر الخطوة (Tap Changer) فيما إذا كان (OLTC أو DETC)، وفي حالتنا هذه نقوم باختيار (OLTC) وذلك بالضغط عليها كما هو مبين بالشكل (3-4-14).



الشكل رقم (3-4-14)

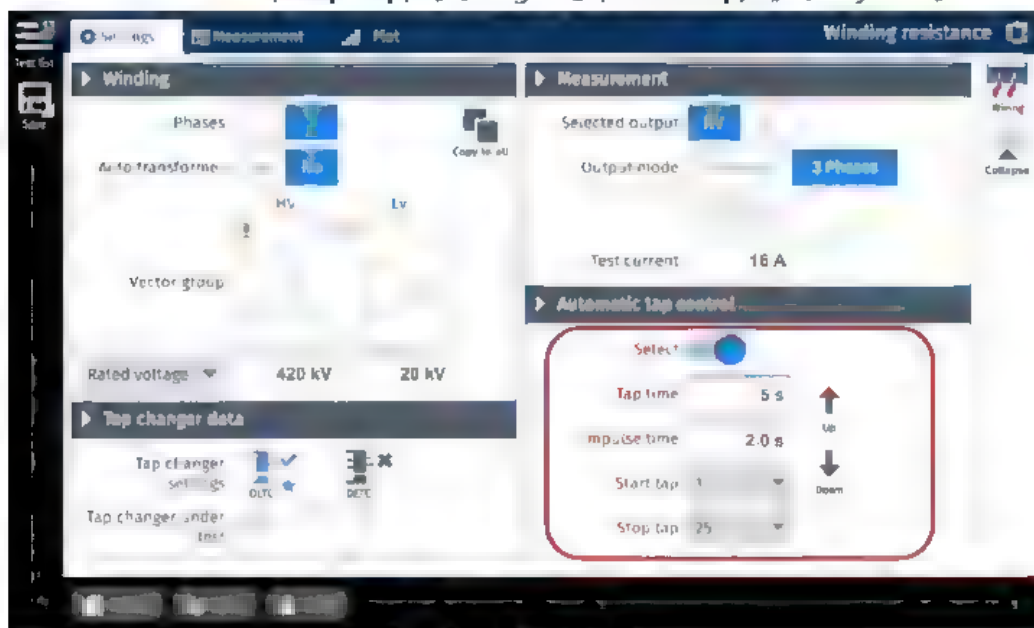
32. تحديد نمط المخرج (Output mode) بالضغط على (3 phases) وذلك لتفعيل الفحص بالنمط ثلاثي الطور، وكذلك تحديد فولتية وتيار الفحص كما هو مبين في الشكل (3-4-15).



الشكل رقم (3-4-15)

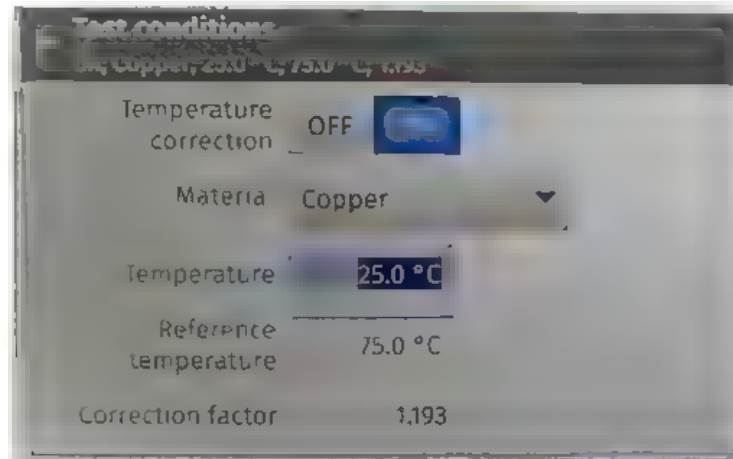
33 ضبط إعدادات مُغيّر الخطوة (Tap Changer) في حال تم إختيار (OLTC) كما هو مبين في الشكل (3-4-16) ووفقاً للخطوات التالية:

- 33.1 تحديد وضع التغير بين الخطوات (Taps) يدوي (Manual) أو تلقائي (Automatic).
- 33.2 تحديد زمن التغير بين الخطوات (Tap time).
- 33.3 تحديد مدة إشارة التغير بين الخطوات (Impulse time).
- 33.4 تحديد خطوة البداية (Start Tap) وخطوة النهاية (Stop Tap).



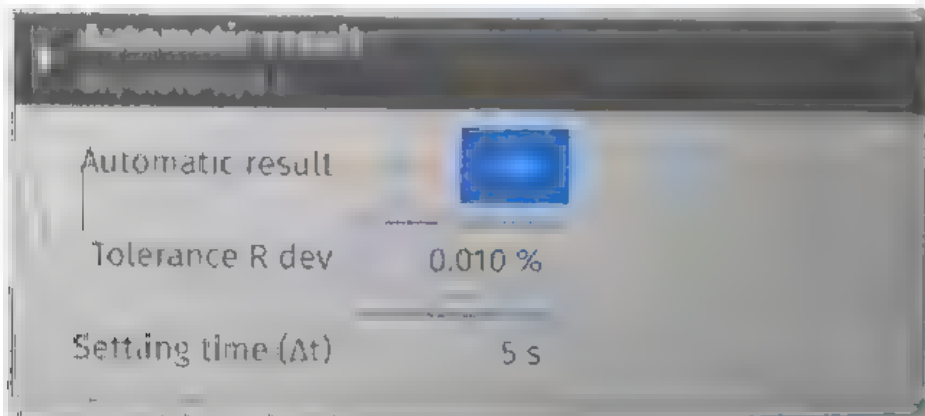
الشكل رقم (3-4-16)

34. لتصحيح قيمة المقاومة المُقاسة لقيمة الحرارة المرجعية يُمكن ضبط الإعدادات التالية في نفس النافذة الرئيسية بالأسفل لهذا الفحص كما هو مُبين بالشكل (3-4-17)، وذلك بإختيار (ON) لتفعيل التصحيح وإختيار المادة المُكونة للملفات وإدخال قيمة درجة حرارة الملفات عند الفحص ومن ثم إختيار قيمة درجة الحرارة المرجعية وفقاً لما تم شرحه مسبقاً في فقرة تصحيح القيمة المُقاسة من فصل فحص مقاومة الملفات وعادة ما تكون (75° C) درجة مئوية.



الشكل رقم (3-4-17)

35. كما ويُمكن تفعيل خاصية حفظ (تسجيل) قيمة المقاومة المقاسة بشكل تلقائي عند الوصول لقيمة تفاوت يتم ضبطها مسبقاً و الثبات عليها لفترة من الزمن يتم ضبطها أيضاً.




الشكل رقم (3-4-18)

36. بالرجوع إلى لوحة التحكم باللمس (Touch Control) و الضغط على علامة التبويب قياسات (Measurements) المحادية لنافذة التبويب إعدادات (Settings) لتظهر الشاشة المُبينة بالشكل (3-4-19) ثم نقوم بالضغط على زر إبدأ (Start) ثم التأكد من إنارة الحلقة الزرقاء حول زر (Start/Stop) وبذلك يكون الجهاز بوضعية الإستعداد للحقن.



الشكل رقم (3-4-19)

37. الضغط على زر إبدأ/توقف (Start/Stop) ليبدأ الفحص ويتم الحقن الفعلي للتيار ويبدأ الضوء الأحمر  والحلقة الزرقاء حول زر (Start/Stop) بالوميض بشكل متقطع.

38. بعد الإنتهاء من الفحص يومض الضوء الأخضر  وبعدها يُمكن إيجاد النتائج في علامة التوبيب قياسات (Measurements) كما هو مُبين بالشكل (3-4-20) وبذلك يكون قد إنتهى الفحص.

Tap	Name	R meas	R dev	R corr	Time	I DC	V DC
1	C	2728.0	0.001 %	2.659.0	5 s	15.595 A	33
1	A	2.125.0	0.002 %	2.661.0	5 s	15.595 A	33
1	B	2.125.0	0.003 %	2.659.0	5 s	15.595 A	33
2	B	2.095.0	0.002 %	2.658.0	5 s	15.595 A	33
2	A	2.095.0	0.001 %	2.623.0	5 s	15.595 A	33
2	C	2.095.0	0.003 %	2.658.0	5 s	15.595 A	33
3	A	2.095.0	0.002 %	2.659.0	5 s	15.595 A	33
3	B	2.168.0	0.003 %	2.659.0	5 s	15.595 A	33
3	C	2.095.0	0.002 %	2.659.0	5 s	15.595 A	33
3	A	2.095.0	0.002 %	2.659.0	5 s	15.595 A	33
3	B	2.095.0	0.002 %	2.659.0	5 s	15.595 A	33
3	C	2.095.0	0.002 %	2.659.0	5 s	15.595 A	33

الشكل رقم (3-4-20)

تحذير: لا تُقْم بإزالة أسلاك الفحص إلا بعد التأكد من أن لمبة الإشارة التحذيرية الحمراء على الواجهة الأمامية (الرئيسية) لجهاز الفحص مُطفئة (OFF) ولمبات الإشار التحذيرية على الواجهة الجانبية لجهاز الفحص مُطفئة (OFF) وكذلك لمبة الإشارة الخضراء على الواجهة الأمامية (الرئيسية) لجهاز الفحص مُضيئة (ON).



الملحق (3-5)

تنويه

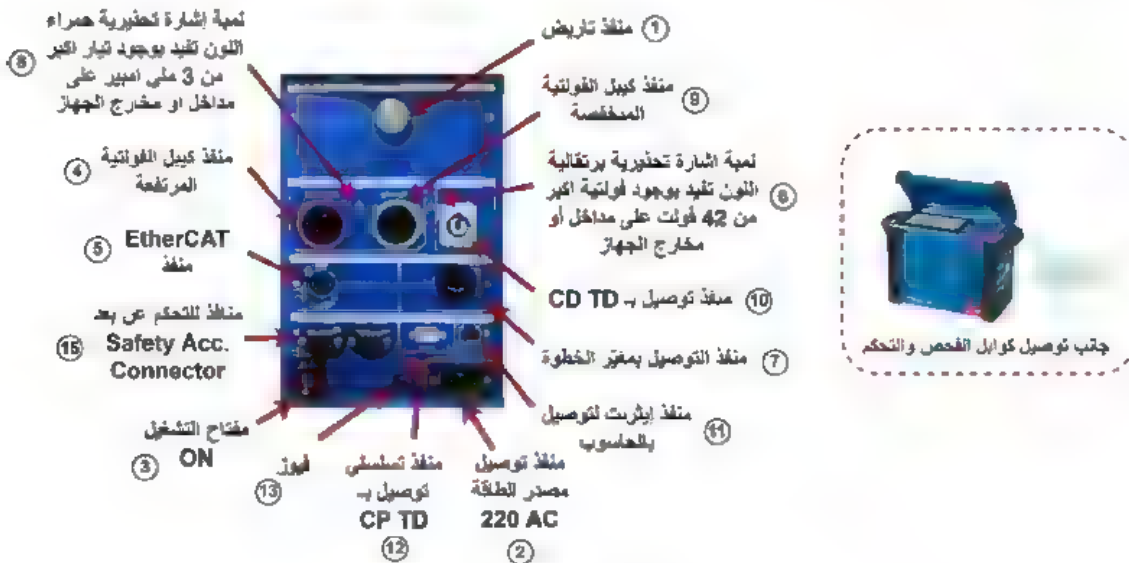
يضم هذا الملحق خطوات الفحص و توصيلاته بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسّط إستناداً على الخبرة بالتعامل مع هذه الأجهزة، وتُجدر الإشارة أنه في حال إستخدام جهاز الفحص المُشار إليه في هذا الملحق لا يجب الإعتماد على هذا الملحق فقط، بل يجب قراءة الكتيبات التفصيلية الخاصة بهذا الجهاز والمزودة بواسطة الشركة المُصنعة الجهاز جيداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية و السلامة العامة

إزالة مغناطيسية القلب الحديدي للمحول بإستخدام جهاز TESTRANO 600 by OMICRON

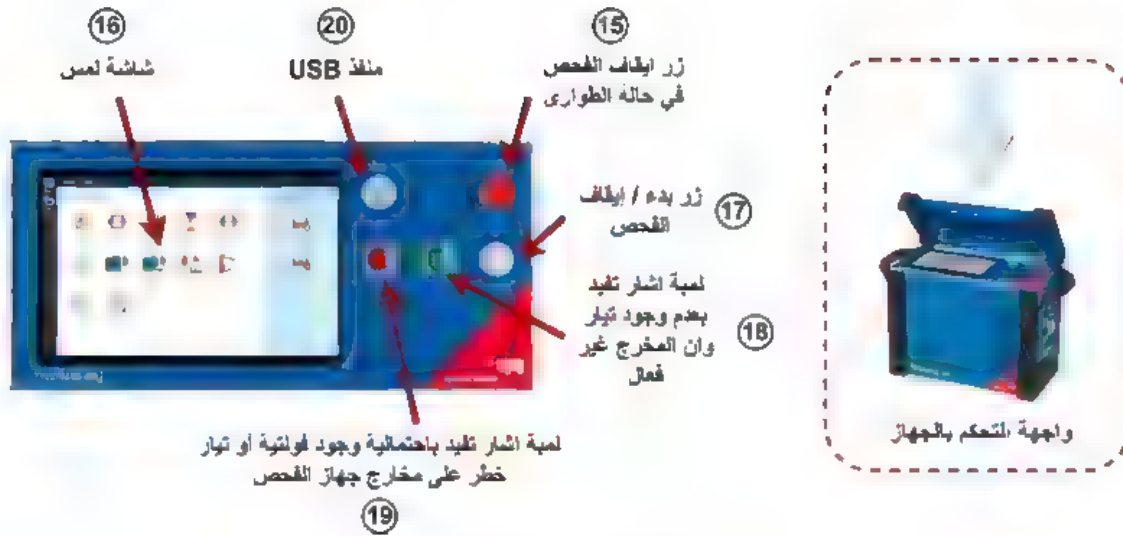


الشكل رقم (3-5-1)

قبل البدء بالخطوات يُفضّل التعرف على أجزاء جهاز الفحص من شاشة ومفاذ وأزرار ومفاتيح تحكم ولمبات إشارة كما هو مُبين بالشكل (3-5-2&3).

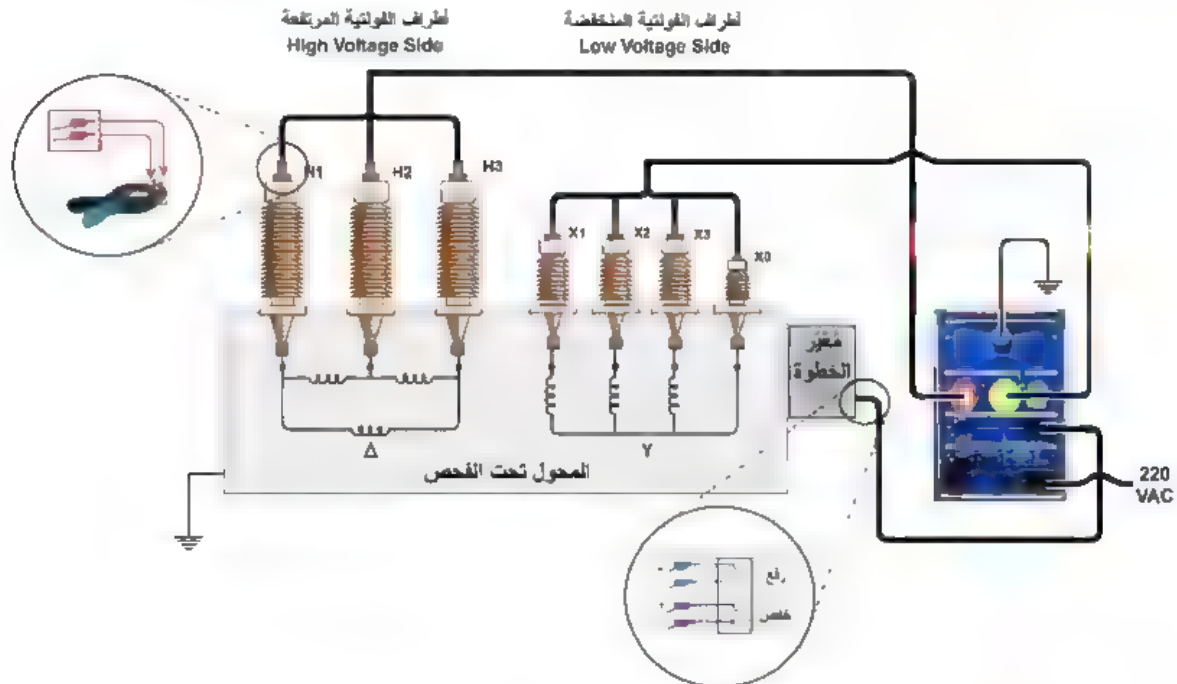


الشكل رقم (3-5-2)



الشكل رقم (3-5-3)

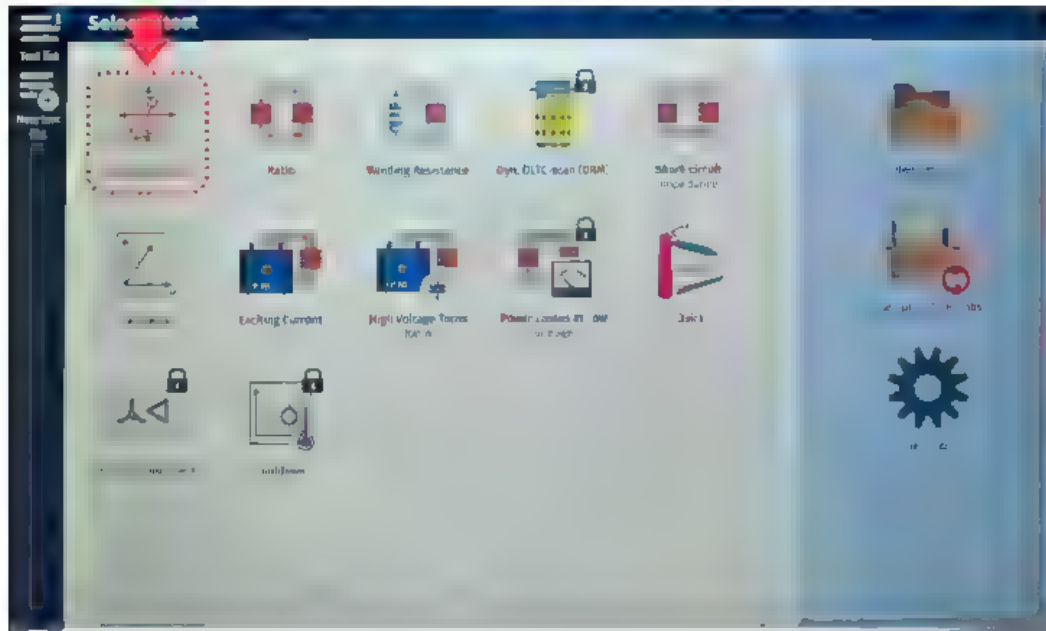
بعد الإنتهاء من إجراء فحص مقاومة الملفات (WRM) وبواسطة نفس التوصيلة المُبينة في الشكل (3-5-4) يُمكن إزالة مغناطيسية القلب الحديدي المتبقية وذلك لتخليص القلب الحديدي من هذه المغناطيسية والتي قد تؤدي لظهور تيارات إندفاع كبير (High inrush currents) عند كهربية المحول (Transformer energization) بعد الإنتهاء من فحص (WRM)، حيث أن هذه التيارات قد تفوق قيمة الإرساء (Setpoint) الخاصة بحماية إرتفاع التيار للمحول (Overcurrent) مما يؤدي لحدوث فصل قسري (Trip) وإجهاد للمحول غير مرغوب به. ومن جهة أخرى يجب إزالة مغناطيسية القلب الحديدي المُتبقية تجنباً لتأثيرها على الفحوصات اللاحقة خاصة فحص نسبة عدد اللفات (TTR) وفحص تيار التهيج (Excitation current) و فحص تحليل الإستجابة الترددية المسحي (SFRA) إذا ما تم إجراؤها مُباشرة بعد فحص مقاومة الملفات (WRM) أو بشكل عام الفحوصات التي تعتمد في فلسفتها بتطبيق فولتية ثابتة (DC) على ملفات المحول.



الشكل رقم (3-5-4)

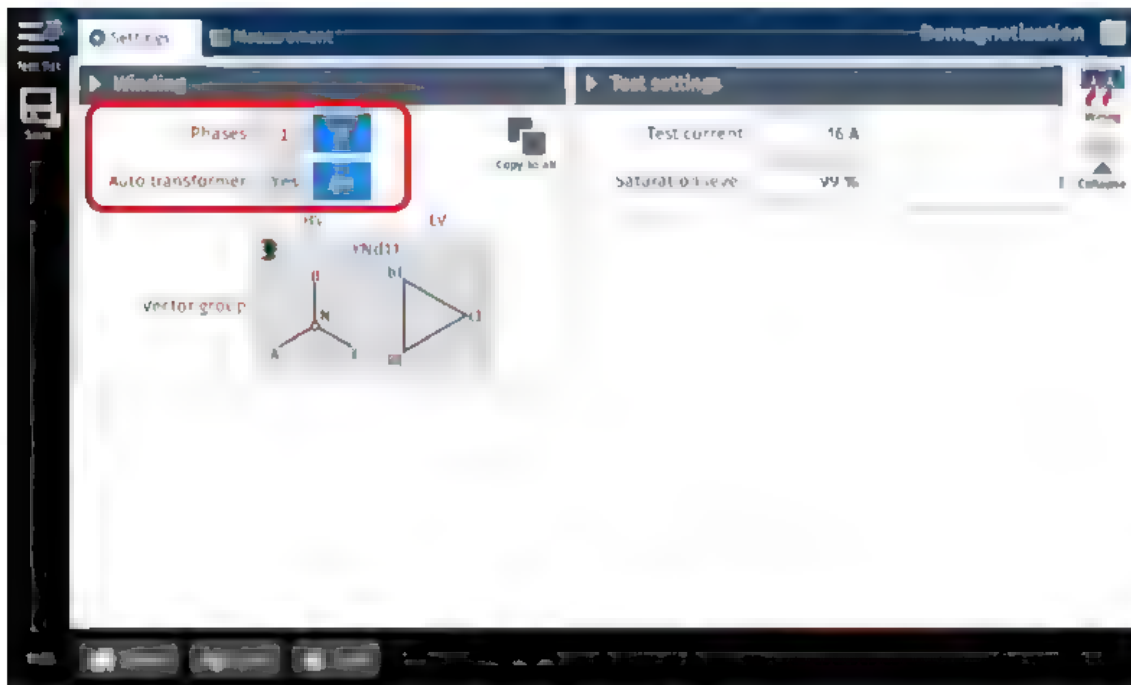
• خطوات إزالة المغناطيسية بواسطة هذا الجهاز:

1. إختيار إزالة المغناطيسية (Demagnetization) من القائمة الرئيسية الظاهرة على شاشة اللمس (Touch Control) والمُبيّنة في الشكل (3-5-5).



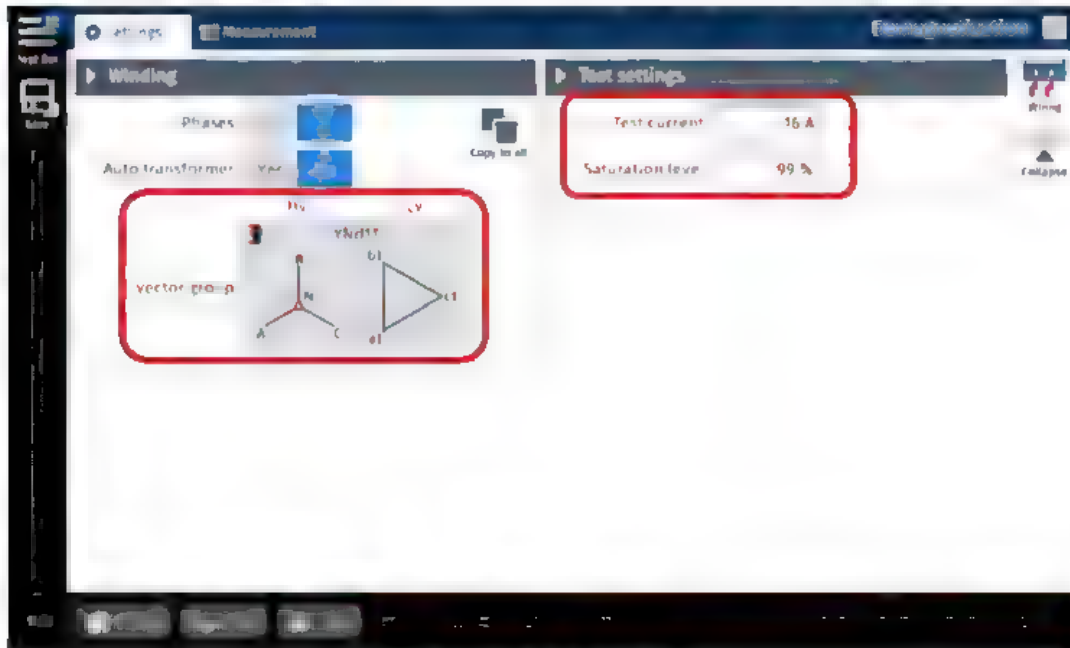
الشكل رقم (3-5-5)

2. لتظهر الشاشة المصينة في الشكل (3-5-6) والتي تكون بالبداية على نافذة التبويب إعدادات (Settings) يتم تحديد عدد أطوار المحول الفرّاد إزالة مغناطيسيته المُتنقية بالضغط على الرقم (3) أي أنه ثلاثي الطور (3 phase transformer)، ثم يتم الضغط على (No) بجانب المحول التلقائي (Auto Transformer).



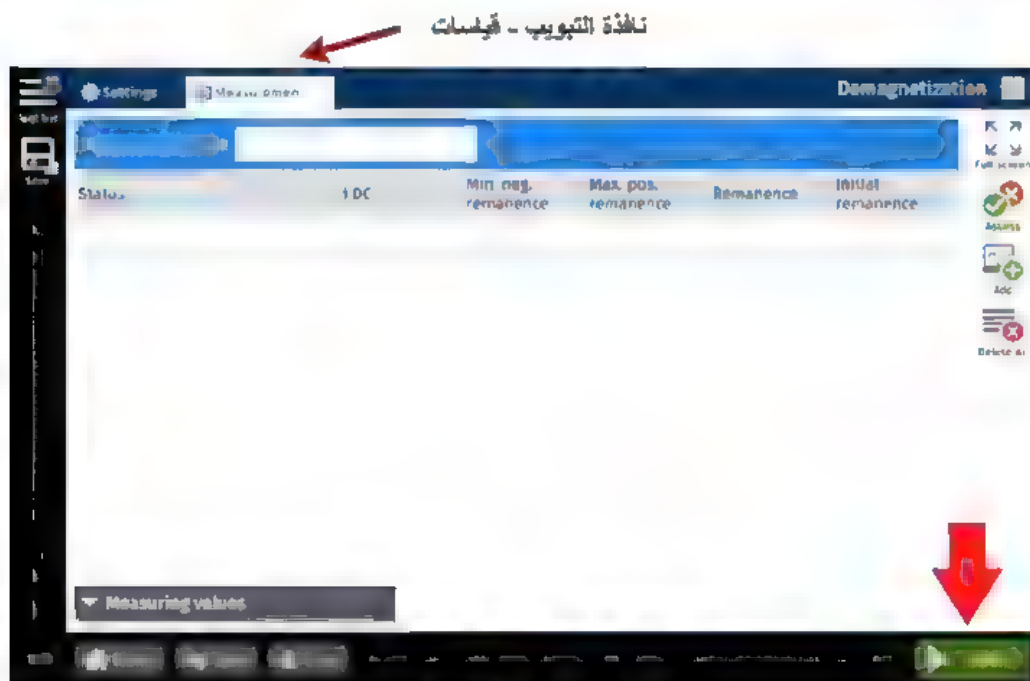
الشكل رقم (3-5-6)

3. تحديد مجموعة التوصيل (Vector group) الخاصة بالمحول بالإضافة لتحديد قيمة التيار كما هو مبين في الشاشة الظاهرة في الشكل (3-5-7).






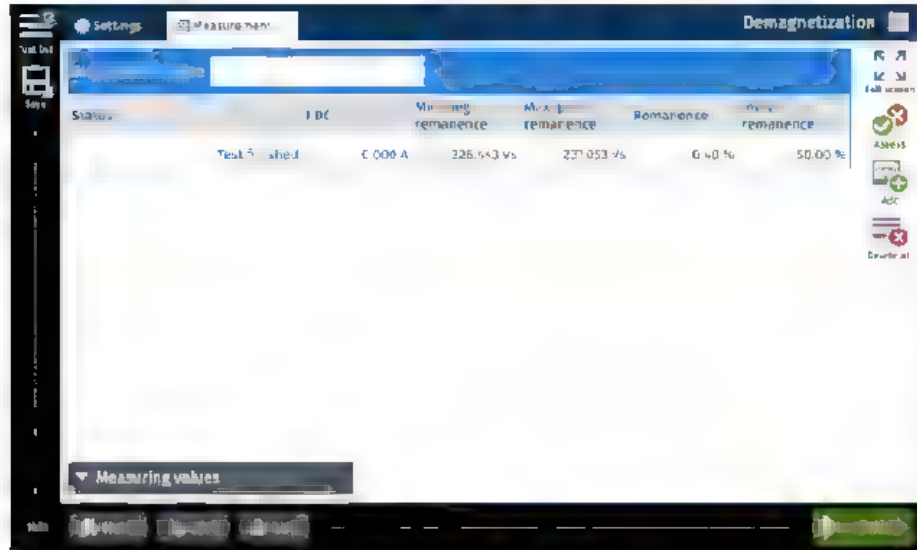
الشكل رقم (3-5-7)

4. الضغط على علامة التنويب قياسات (Measurements) المحاذية لنافذة التوبيب إعدادات (Settings) لتظهر الشاشة المُبينة بالشكل (3-5-8) ثم نقوم بالضغط على زر إبدأ (Start) ثم التأكد من إنارة الحلقة الزرقاء حول زر (Start/Stop) وذلك يكون الجهاز بوضعية الإستعداد للحقن.



الشكل رقم (3-5-8)

5. الضغط على زر إبدأ/توقف (Start/Stop) ليبدأ الفحص ويتم الحقن الفعلي للتيار ويبدأ الصوء الأحمر  والحلقة الزرقاء حول زر (Start/Stop)  بالوميص بشكل متقطع.
6. بعد الإنتهاء يومض الصوء الأخضر  وبعدها يُمكن إيجاد النتائج في علامة التبويب قياسات (Measurements) كما هو مُبين بالشكل (3-5-9) وبذلك تكون قد إنتهت عملية إزالة المغنطة بنجاح.



الشكل رقم (3-5-9)

الفصل الرابع

فحص نسبة عدد لفات المحول

Transformer Turns Ratio Test (TTR)



فحص نسبة عدد لفات المحول

Transformer Turns Ratio Test (TTR)

يُعتبر فحص نسبة عدد لفات المحول من الفحوصات المهمة لمعرفة حالة الملفات الداخلية ولمحاكاة الحاصية التشغيلية الأساسية للمحول وهي تحويل الطاقة الكهربائية من مستوى فولتية إلى آخر مع ثبات القدرة، حيث يُعبّر هذا الفحص عن نسبة عدد لفات ملفات الفولتية المرتفعة (HV windings) إلى عدد لفات ملفات الفولتية المنخفضة (LV windings) لكل طور من أطوار المحول، كما ويُعتبر هذا الفحص من الفحوصات غير التدميرية (Non-destructive test) أي أنه لا يؤثر على سلامة العزل وذلك لأن مقدار فولتية الفحص أقل من مقدار الفولتية الإسمية الخاصة بالمحول.

وكما ذكر سابقاً فإن سلامة أي محول تتلخص في سلامة ثلاثة أنظمة داخلية للمحول وهي نظام العزل والنظام الميكانيكي والنظام الحراري، حيث أن أي فشل في أي من هذه الأنظمة سيؤدي إلى فشل المحول بالكامل، وهذا الفحص يُمكن من الكشف عن سلامة نظام العزل والنظام الميكانيكي للمحول وذلك بالكشف عن وجود قصور بين اللفات (فشل نظام العزل)، أو وجود قطع كلي بالملفات (فشل ميكانيكي) أو وجود مشكلة في القلب الحديدي للمحول.

1. متى يتم إجراء هذا الفحص ولماذا؟

هناك عدة أسباب تدفعنا لإجراء هذا الفحص ومن هذه الأسباب ما هو روتيني للتأكد من سلامة المحول أو تشخيصي لتحديد الأعطال في المحول (وهو مجال بحثنا في هذا الكتاب) أو لأسباب خاصة أخرى، وتتلخص هذه الأسباب بالآتي:

1.1 في المصنع لضبط الجودة المصنعية (Quality Control - QC) وكذلك يُعتبر من فحوصات القبول المصنعية (Factory Acceptance Test - FAT) للتأكد من سلامة المحول ومطابقته للتصميم قبل نقله للموقع.

1.2 في الموقع قبل كهرية المحول للمرة الأولى (Transformer first energization) كأحد فحوصات القبول الموقعية (Site Acceptance Test - SAT) للتأكد من سلامة المحول بعد نقله وتركيبه في الموقع.

1.3 قبل كهرية المحول (Transformer energization) بعد عمليات الصيانة المختلفة في الموقع، خاصة عمليات الصيانة التي يتم خلالها فتح دائرة الملفات كصيانة مُغيّر الخطوة (Tap-changer).

1.4 قبل كهرية المحول (Transformer energization) بعد تغيير وضعية مُغيّر الخطوة (Tap-changer) من نوع (De-energized Tap Changer DETC or OCTC)، وذلك لضمان عدم وجود فتح بدائرة الملفات الداخلية للمحول (Open circuit).

1.5 للتأكد من مجموعة التوصيل للمحول (Vector group).

1.6 بشكل روتيني (Routine test) وذلك للكشف عن وضع المحول الحالي وإستخدام نتيجة هذا الفحص كمرجع (Reference value).

1.7 تحديد الأعطال داخل المحول (Fault detection - Diagnostic test)، وهو ما سيتم تناوله في هذا الفصل.

2. الدوافع التشخيصية لعمل هذا الفحص وما هي الأعطال التي يتم الكشف عنها

يتم اللجوء لعمل هذا الفحص بهدف تشخيصي في حال حدوث فصل قسري للمحول (Trip) نتيجة لتفعل مُرحل البوخلز (Buchholz Relay)، أو في حال ظهور نتائج غير مُرضية لفحص الغازات الذائبة في الزيت (Dissolved Gas Analysis - DGA).

كما ويُعد تعرض المحول لإجهاد ميكانيكي كإلهتزازات أو النقل أو الصدمات، بالإضافة إلى تعرض المحول إلى إجهاد ناتج عن عطل كهربائي مثل الأعطال الأرضية (Earth Faults) وما ينتج عنها من تيارات قِصر ذات قِيَم مرتفعة من الأمور التي تدفعنا لإجراء هذا الفحص بهدف تشخيصي.

ومن الأعطال التي يتم الكشف عنها من خلال هذا الفحص:

- وجود قِطْع كَلِي في ملفات المحول (Open circuit).
- وجود قِصر (Short circuit) بين لفات الملفات المختلفة من المحول أو بين اللفات من نفس الملف.
- وجود نقاط توصيل رديئة (Poor electrical connections) في المحول، مثل وجود إرتخاء (Loose) في نقاط توصيل موصلات عوازل الإختراق أو كما تُسمى حُلْب المحول (Bushing leads) بملفات المحول، أو وجود إرتخاء في نقاط توصيل ملفات المحول بمغَيِّر الخطوة (Tap changer).
- وجود مشكلة في القلب الحديدي للمحول (Iron Core).

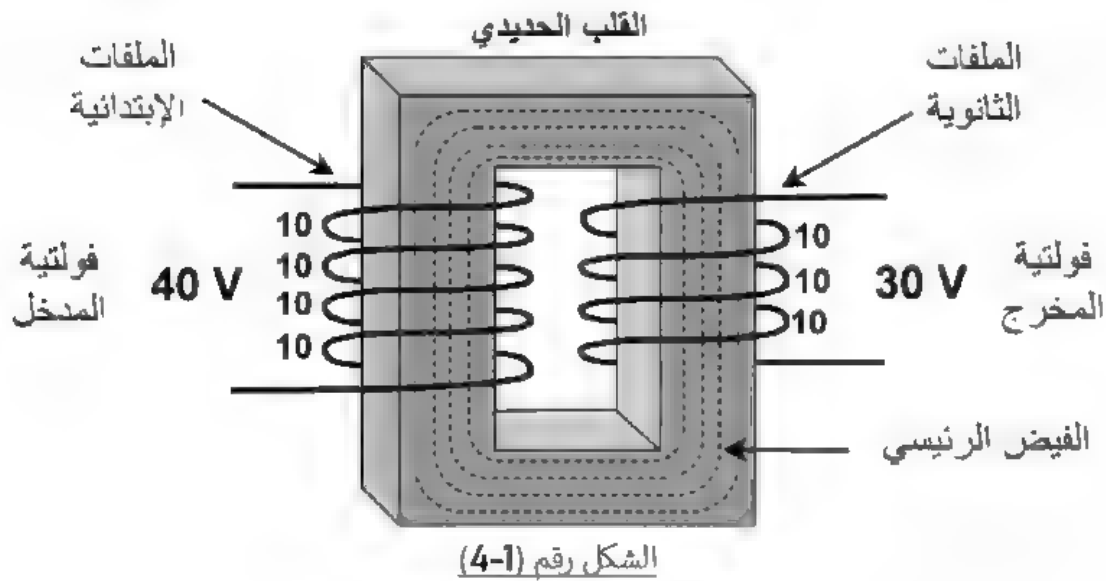
3. فلسفة الفحص

في هذا الفحص يتم قياس نسبة الفولتية للمحول بتطبيق فولتية مترددة (AC Voltage) على ملفات الفولتية المرتفعة (HV Winding) أو الفولتية المنخفضة (LV Winding) وقياس الفولتية المتولدة على أطراف المحول الأخرى المفتوحة (HV أو LV) ومن ثم يتم إحتساب النسبة بين الفولتيتين (RMS values)، وهذا بدوره يُعطينا قيمة تُسمى نسبة الفولتية للمحول (Transformer Voltage Ratio - TVR) ومنها يُمكن معرفة نسبة عدد لفات المحول (Transformer Turns Ratio - TTR).

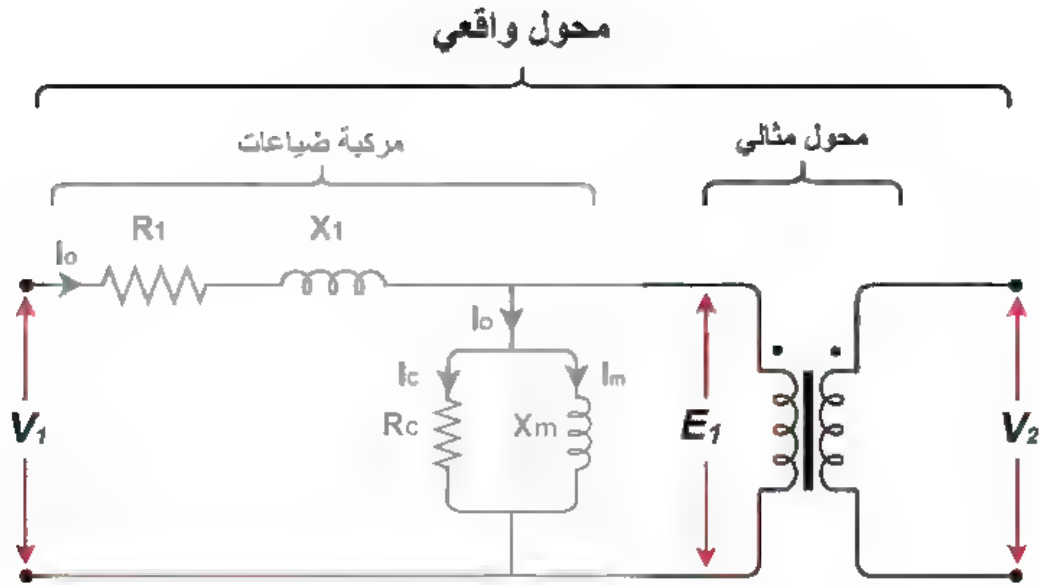
ولكن يبقى التساؤل المطروح "ما العلاقة التي تربط نسبة فولتية المحول (Transformer Voltage Ratio - TVR) بنسبة عدد اللفات لهذا المحول (Transformer Turns Ratio - TTR)؟ وهل هما نفس الشيء؟"

كإجابة عن هذا التساؤل وكما هو معلوم فإن عدد لفات الملفات الابتدائية والثانوية للمحول تُحدد نسبة الفولتية التي سيتم تحويلها باستخدام هذا المحول، أي أنه عند تطبيق فولتية مترددة على الملفات الابتدائية للمحول فإن هذه الفولتية يتم تقاسمها بالتساوي بين لفات الملفات الابتدائية بحيث يُصبح لكل لفة قيمة فولتية مُعيّنة خاصة بها (Voltage per turn) مساوية لفولتية باقي لفات الملفات الابتدائية وكذلك الثانوية كما هو مُبين بالشكل (4-1)، ومن خلال ذات الشكل يُمكن ملاحظة أن جميع لفات ملفات المحول تحمل نفس المقدار من الفولتية مما يُولد رابطاً قوياً بين عدد لفات ملفات المحول من جهة ونسبة الفولتية المتولدة على أطرافه من جهة أخرى، وأي اختلاف في عدد اللفات سوف يُصاحبه اختلاف في الفولتية المتولدة.

حيث أننا لو قُمنّا على سبيل المثال بتثبيت فولتية المدخل وإنقاص عدد لفات الملف الابتدائي للمحول الطاهر في الشكل (4-1)، فإن قيمة فولتية اللفات المتبقية (Voltage per turn) سوف تزداد للملفات الابتدائية والثانوية مما يعني زيادة في قيمة الفولتية الثانوية المتولدة. وهذا بدوره يوضح مبدأ عمل مُغَيِّر الخطوة (Tap-changer) بشكل مُبسّط.

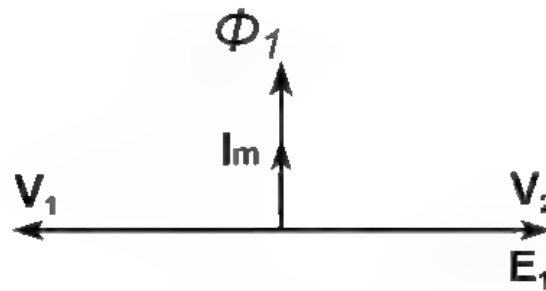


وكنتيجة أولية لما تم شرحه يُمكن القول أن نسبة الفولتية للمحول (TVR) مساوية لنسبة عدد لفات المحول (TTR) تحت ظروف مُعيّنة، حيث أنه للمحول المثالي (Ideal Transformer) في حالة اللاحمل أو الدائرة المفتوحة (Open Circuit أو No-Load) أي أن أطرافه الثانوية مفتوحة وغير متصلة بحمل تكون نسبة الفولتية للمحول (Transformer Voltage Ratio - TVR) مساوية لنسبة عدد لفات المحول (Transformer Turns Ratio - TTR)، ويُمكن ملاحظة ذلك من الرسم الموضح في الشكل (4-2) للدائرة المكافئة للمحول.



الشكل رقم (4-2)

حيث أن نسبة الفولتية (TVR) على اعتبار أن المحول مثالي (Ideal Transformer) تساوي ناتج قسمة (E_1/V_2) الظاهرة في الشكل (4-2)، ونظراً لإهمال تيار الاحمل (I_0 - No-Load Current) وما ينتج عنه من هبوط بالفولتية فإن قيمة نسبة الفولتية (TVR) تكون مساوية لقيمة نسبة عدد لفات المحول (TTR) كما هو مبين في الرسم المُتجهي الموضح في الشكل (4-3) والخاص بمحول مثالي (Ideal Transformer) آحادي الطور نسبة تحويله 1:1 في حالة الاحمل أو الدائرة المفتوحة (Open Circuit or No-Load).

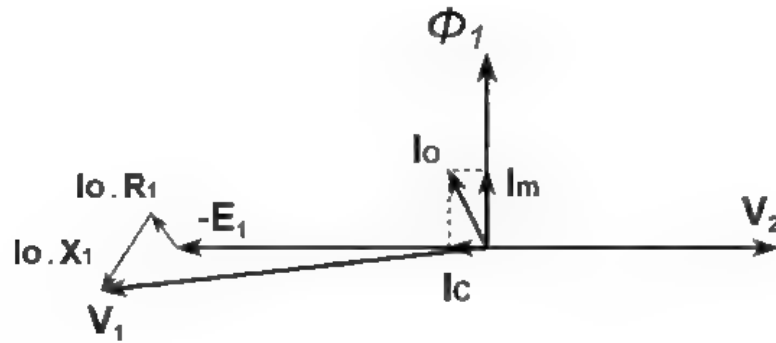


الشكل رقم (4-3)

أما عملياً فيما يُخَصّ المحولات الواقعية (Actual Transformer) في حالة الاحمل (No-load) فإن نسبة الفولتية للمحول (TVR) تكون أقل من نسبة عدد لفات المحول (TTR) بقليل، وتعود هذا الاختلاف بين القيمتين للضياعات المختلفة في الفولتية والناتجة عن:

- ✓ قيمة مقاومة الملفات الابتدائية (R_1) والتي تُمثل الضياعات المادية أو الحاسية.
- ✓ قيمة المُفاعلة الحثية للملفات الابتدائية (X_1) التي تُمثل ضياعات الفيض المُتسرب.
- ✓ قيمة تيار الاحمل (I_0) والذي يعتمد على قيمة المقاومة المادية (R_C) وقيمة المُفاعلة الحثية (X_m) بالإضافة لقيمة الفولتية (V_1) المُطبقة على الملفات الابتدائية.

ومنه فإن نسبة الفولتية للمحول الواقعي (Actual Transformer) تكون ناتج قسمة (V_1/V_2) الظاهرة في الدائرة المكافئة الموضحة بالشكل (4-2) السابق. كما ويُمكن ملاحظة الاختلاف في قيم الفولتيات الناتج عن الضياعات سابقة الذكر من خلال الرسم المُتجهي والموضح في الشكل (4-4) والخاص بمحول واقعي (Actual Transformer) أحادي الطور نسبة تحويله 1:1 في حالة اللاحمل (No-load).



الشكل رقم (4-4)

الخلاصة: يُمكن إعتبار أن قيمة نسبة عدد لفات المحول (TTR) تساوي حاصل قسمة (E_1/V_2) الظاهرة في الشكل (4-2) السابق، و لصعوبة معرفة قيمة الفولتية (E_1) فإن القيمة التي يتم قياسها خلال هذا الفحص هي حاصل قسمة (V_1/V_2) والتي تكون أقل من قيمة نسبة عدد لفات المحول (E_1/V_2) بنسبة تبين قرابة الـ (0.1%) بالمئة نتيجة للضياعات في المحول الواقعي الناتجة عن قيمة ($R_1, X_1, \text{ and } I_0$).

وهذه المُركبات ($R_1, X_1, \text{ and } I_0$) تكون ذات قيمة ثابتة ومعلومة أثناء الظروف التشغيلية الإسمية للمحول، أم أثناء الفحص ولإنخفاض قيمة الفولتية المُطبقة (مما يعني كثافة فيص مغناطيسي أقل في القلب الحديدي) فإن قيمة المُركبات (R_C و X_m) لا يُمكن معرفتها لأنها تعتمد على قيمة كثافة الفيض المغناطيسي في القلب الحديدي، ولسوء الحظ لا يُمكن معرفة قيمة تيار اللاحمل (I_0) نتيجة لإحتلاف قيمة المقاومة المادية (R_C) و المفاعلة الحثية (X_m) اللتان تعتمدان على قيمة كثافة الفيض في القلب الحديدي أثناء الفحص.

- لماذا يجب إجراء هذا الفحص أثناء فتح أطراف المحول أو ما يُسمى بحالة اللاحمل (No-Load أو Open circuit)؟

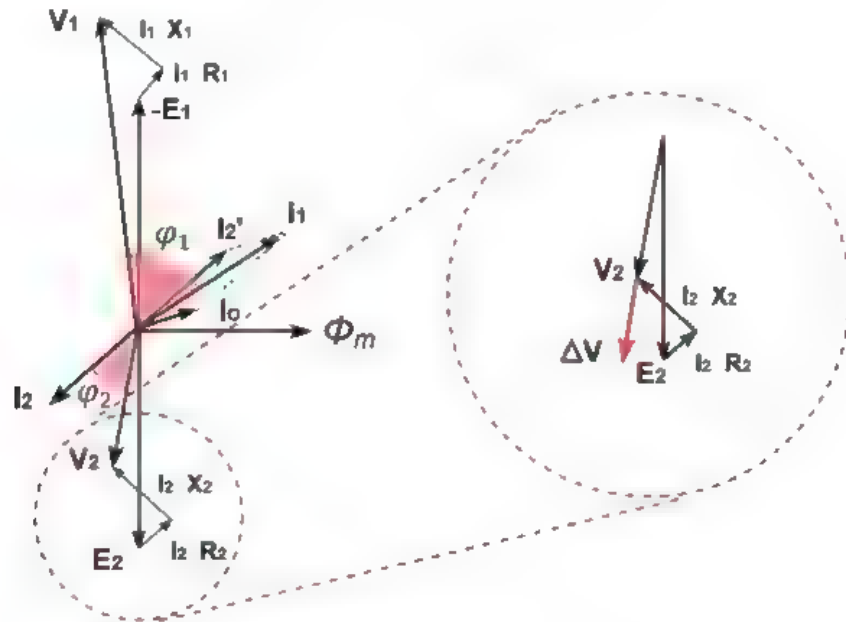
عندما يكون المحول غير مُتصل بحمل على أطرافه الثانوية تكون فولتية هذه الأطراف تقريباً مساوية للفولتية المُطبقة على الملفات الابتدائية ونسبة التباين لا تتجاوز الـ (0.5%) بالمئة على إعتبار أن المحول نسبة تحويله (1:1)، وذلك نتيجة لتأثير قيمة مقاومة الملفات الابتدائية وقيمة الفيض الابتدائي المُتسرب والذي تم شرحه سابقاً، أما في حال كان المحول متصل بحمل فإن الفولتية المتولدة على الأطراف الثانوية ستكون غير مساوية للفولتية المُطبقة على الملفات الابتدائية ويَعُود هذا الإحتلاف للأسباب التالية:

✓ مقدار زاوية الطور بين الفولتية المتولدة على الأطراف الثانوية و تيار الملف الثانوي وكذلك طبيعة الحمل فيما إذا كان حمل حثي (زاوية طور ذات قيمة سالبة) أو حمل سعوي (زاوية طور ذات قيمة موجبة). أي بمعنى آخر أن فولتية المحول الثانوية تزداد في حال إتصاله بحمل سعوي وتنخفض في حال إتصاله بحمل حثي.

✓ مقدار التيار المار في الملفات الثانوية (مقدار تحميل المحول) وما ينتج عنه من مركبات للضباغات في مقاومة الملفات الثانوية (R_2) و المُفاعلة الحثية للملفات الثانوية (X_2). حيث أنه وكما هو معلوم أن مقدار التيار يتناسب طردياً مع مقدار الضباغات، ففي حالة اللاحمل (No-load) تكون قيمة التيار الثانوي (I_2) مساوية للصفر مما يعني ضباغات ثانوية ناتجة عن (R_2 و X_2) مساوية للصفر، والعكس بالعكس في حال وصل المحول بحمل.

✓ مُعاوقة القِصر للمحول (Short-circuit impedance). حيث أن قيمتها تتناسب تناسباً طردياً مع مقدار الهبوط في الفولتية (Voltage drop).

وهذا الاختلاف في الفولتية على أطراف الملف الثانوي للمحول بين حالة عدم التحميل (No-load) أو (Open circuit) و حالة التحميل (Loaded) يُمكن ملاحظته عبر الرسم المُنتجهي التالي والموضح في الشكل (4-5) لمحول متصل بحمل حثي على اعتبار أن نسبة التحويل (1:1).



الشكل رقم (4-5)

حيث:

E_2 : فولتية الأطراف الثانوية في حالة اللاحمل (No-load) أو (Open-circuit).

V_2 : فولتية الأطراف الثانوية في حالة التحميل (Loaded).

$I_2 \cdot R_2$: فولتية القِصر الفعالة (Active short-circuit voltage).

$I_2 \cdot X_2$: فولتية القِصر غير الفعالة (Reactive short-circuit voltage).

I_2 : تيار الملفات الثانوية الفعلي.

ΔV : فرق الفولتية بين حالة عدم التحميل و حالة التحميل لملفات المحول الثانوية (مقدار

الهبوط في الفولتية نتيجة لوصل المحول بحمل حثي).

ولحساب مقدار الهبوط في الفولتية (ΔV) نتيجة لوصل المحول بحمل حثي بالإعتماد على المخطط المُتجهي السابق يُمكن إيجاد هذه المعادلة:

$$\Delta V = \left[n(I_2 \cdot R_2 \cos \Phi 0.016 + I_2 \cdot X_2 \sin \Phi 0.036) + 1 - \sqrt{1 - n^2(I_2 \cdot R_2 \sin \Phi 0.012 - I_2 \cdot X_2 \cos \Phi 0.048)^2} \right] \cdot E_2$$

$$n = \frac{I}{I_2}$$

حيث:

n : التحميل النسبي للمحول.

I_2 : التيار الفعلي للملفات الثانوية.

I : التيار الإسمي للملفات الثانوية.

فمثلاً لو كانت قيمة التحميل النسبي للمحول (n) مساوياً (1) أي أن المحول محمل تحملاً كاملاً وقيمة فولتية القِصر الفعالة ($I_2 \cdot R_2$) مساوية لـ (0.02) وقيمة فولتية القِصر غير الفعالة ($I_2 \cdot X_2$) مساوية لـ (0.06) و معامل القدرة مساوياً لـ (0.8) وكان الحمل حثي وبعد تطبيق المعادلة السابقة فإن مقدار الهبوط في الفولتية (ΔV) سيساوي قرابة الـ (5%) بالمئة من الفولتية الكاملة للملفات الثانوية في حالة عدم التحميل (E_2).

ملحوظة (4-1): في حال كان الحمل المُتصل بالمحول حمل حثي فإن فولتية التحميل (V_2) ستكون منخفضة مقارنة بفولتية اللاحمل (E_2) للمحول، أما في حالة الحمل السعوي فإن فولتية التحميل (V_2) ستكون مرتفعة مقارنة بفولتية اللاحمل (E_2) للمحول.



لذلك ولتجنب تأثير فرق الفولتية الناتج عن تحميل أو قِصر الأطراف الثانوية للمحول (Short circuit or Loading)، يُصبح بإجراء هذا الفحص أثناء فتح أطراف (Open Circuit) المحول الثانوية أو ما يُسمى بحالة اللاحمل (No-load).

- كيف يُدل هذا الفحص على وجود قِصر (Short circuit) أو قطع كُلي (Open circuit) في ملفات المحول أو وجود عطل في القلب الحديدي:

في حال حدوث قِصر بين لفات ملفات المحول (Short circuit or interturn) فإن هذا القِصر يَنُتُج عنه تيارات دوّارة (Circulating currents) مُحَدِّثة زيادة في الفيض المُتسرب، والذي من شأنه عمل اختلاف بين الفولتية المُطبَّقة على الملفات الابتدائية والفولتية المُتولدة على أطراف الملفات الثانوية مما يعيى اختلاف في قيمة فحص نسبة لفات المحول (TTR) المُشتقة من قيمة نسبة الفولتية للمحول (TVR) ومنه يُمكن كشف هذا النوع من الأعطال.

أما فيما يخص حدوث قطع كُلي في الملفات (Open Circuit) فإنه يُمكن تلخيص هذه الحالة بالإحتمالات التالية (في حال فحص كل طور على حدة أي باستخدام مصدر فولتية أحادي الطور):

✓ وجود قطع كلي في الملفات الابتدائية الموصولة على شكل نجمة (Y - Star).

في هذه الحالة عند تطبيق فولتية على ملف الطور المعطوب (مكان وجود القطع) فإن الفيض بالغالب لن يتكون بالقلب الحديدي ولن يتم الحصول على قراءات فولتية على أطراف الملف الثانوي.

✓ وجود قطع كلي في الملفات الابتدائية الموصولة على شكل مثلث (Delta - Δ).

في هذه الحالة عند تطبيق فولتية على الملف المعطوب (مكان وجود القطع) فإن الفيض المتكوّن في القلب الحديدي هو بسبب شحن الملفين الآخرين (السليمين)، مما يعني تكوّن فولتية على أطراف الملف الثانوي بمستوى أقل من المستويات الطبيعية مما يؤثر على نتيجة الفحص ويدلّ على وجود هذا النوع من الأعطال.

✓ وجود قطع كلي في الملفات الثانوية.

في هذه الحالة لن يمر تيار في الملفات الثانوية وسوف يتم قراءة صفر فولتية بواسطة جهاز قياس الفولتية مما يعني قيمة نسبة فولتية لا نهائية (ناتج قسمة قيمة فولتية الملفات الابتدائية على صفر).

ملحوظة (2-4): هذا الفحص يُساعد على كشف الأعطال التي تتعلق بالقطع الكلي (Open circuit) للملفات بكفاءة عالية، أم فيما يخص القطع الجزئي (Crack) للملفات فإن هذا الفحص غير فعال كفاية ويجب الإستعانة بفحوصات أخرى أكثر كفاءة وحساسية حيال هذا النوع من الأعطال مثل فحص مقاومة الملفات (Winding resistance - WRM).



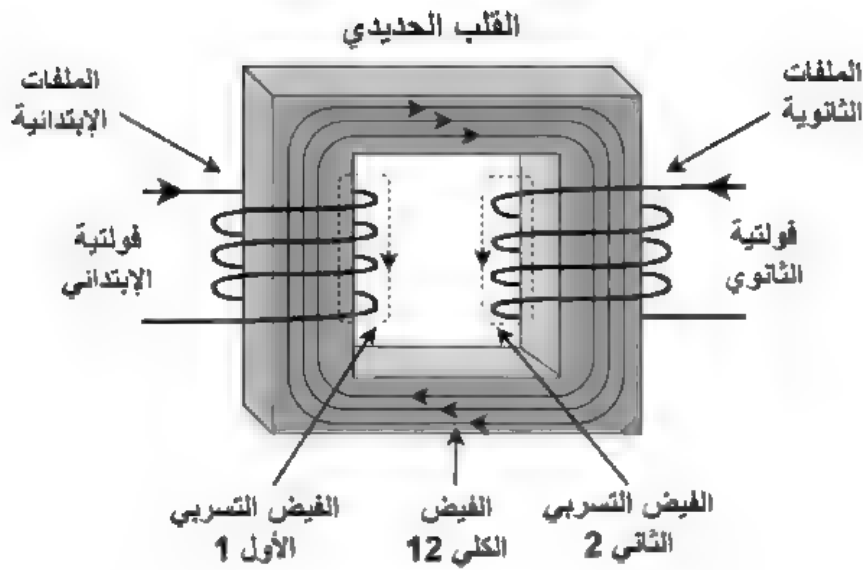
وفيما يخص أعطال القلب الحديدي (Iron Core) للمحول فإنه عند تطبيق فولتية مترددة على ملفات الفولتية المرتفعة (HV windings) سيتولد فيض في القلب الحديدي بشكل يتناسب طردياً مع قيمة الفولتية لكل لفة (Voltage per turn)، ولكن عملياً هذا الفيض المتولد نتيجة لمرور تيار في الملف الابتدائي لا ينتقل (Coupled) عبر القلب الحديدي إلى الملف الثانوي بنسبة مئة بالمئة على شكل فيض مشترك (Mutual flux)، وإنما هالك جزء يكون على شكل فيض متسرب (Leakage flux) وذلك يعتمد على:

✓ قيمة محاثّة ملفات المحول (Winding Inductance).

✓ تصميم القلب الحديدي (Core Design).

✓ تركيب القلب الحديدي (Core Construction).

✓ نفاذية القلب الحديدي (Core Permeability).



الشكل رقم (4-6)

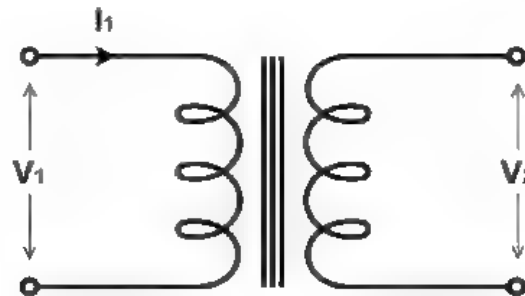
حيث أن الفولتية المتولدة على أطراف الملفات الابتدائية تعتمد على قيمة محاثّة الملفات الابتدائية كما هو مُبين بالمعادلة (4.1) التالية:

$$V_1 = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (4.1)$$

أما الفولتية المتولدة على أطراف الملفات الثانوية فإنها تعتمد على قيمة المحاثّة المشتركة (Mutual Inductance) كما هو مبين بالمعادلة (4.2) التالية:

$$V_2 = M_{12} \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (4.2)$$

حيث أنه وبالرجوع لمنحنى (B-H) الخاص بالمادة المكوّنة للقلب الحديدي يُمكن ملاحظة أن شدة المجال المغناطيسي (H) غير ثابتة وإنما تتغير بتغيّر الفولتية المطبقة، فزيادة الفولتية المطبقة تزداد شدة المجال المغناطيسي وكذلك النفاذية المغناطيسية (μ) مما يزيد الفيض المشترك بين الملفات الابتدائية والثانوية (Mutual Flux - M_{12}).



الشكل رقم (4-7)

لذلك يُمكن لهذا الفحص الكشف عن وجود مشاكل في القلب الحديدي للمحول كوجود مشكلة في تركيب القلب أو وجود فشل في العزل بين الرقائق المعدنية المُكونة للقلب، والتي بدورها تؤثر على قيمة الفيض المُنتقل من الملفات الابتدائية للملفات الثانوية (M_{12} - Mutual Flux) مما يؤدي لإختلاف قيمة الفولتية المُتولدة ومنه إختلاف قيمة نسبة الفولتية للمحول (TVR) وقيمة فحص نسبة لفات المحول (TTR) المُشتقة منها.

كما ويُمكن الكشف عن أعطال القلب الحديدي كوجود قصر بين الرقائق المُكونة للقلب الحديدي عن طريق قياس إنحراف الطور (Phase Deviation) والذي يزداد بإزداد قيمة التيارات الدوامية في القلب والنتيجة عن قصر بين الرقائق سابقة الذكر، وتُجدر الإشارة إلى أن بعض أجهزة فحص نسبة عدد اللفات الحديثة تقوم بإظهار مقدار إنحراف الطور (Phase Deviation) بالإضافة إلى قيمة نسبة عدد اللفات (TTR) وفي بعض الأحيان تُعطي هذه الأجهزة قيمة تيار التهيج (Excitation Current) والذي من شأنه أيضاً الكشف عن أعطال القلب الحديدي والذي سيأتي ذكره في الفصل الخامس بشكل مفصل كفحص مُستقل.

4. طرق الفحص

يُمكن إجراء هذا الفحص بالطريقة التقليدية أو كما تُسمى بطريقة جهاز قياس الفولتية (Voltmeter method)، أو بواسطة أجهزة الفحص الإلكترونية الحديثة وذلك وفقاً للتجهيزات المتوفرة في موقع الفحص كآلاتي:

4.1 طريقة جهاز قياس الفولتية – Voltmeter Method

كما ذكر أنفاً فإن هذا الفحص يتم بتطبيق فولتية مترددة (AC Voltage) على الملفات الابتدائية وقياس الفولتية المُتولدة على أطراف الملفات الثانوية المفتوحة للمحول ومن ثم يتم إحتساب النسبة بين الفولتيتين (RMS values)، ويتم ذلك بإستخدام مصدر فولتية مترددة (AC voltage) أحادي الطور (Single phase) أو ثلاثي الطور (Three phase) حيث يُفضّل إستخدام المصدر أحادي الطور للكشف عن حالات القطع الكلي للملفات (Open circuit) بكفاءة أكبر.

ويتم إجراء هذا الفحص بهذه الطريقة بأسلوبين رئيسيين:

✓ **الأسلوب التنازلي - Step-Down method:** وذلك بتطبيق الفولتية المترددة (AC voltage) على ملفات الفولتية المرتفعة (HV windings) و قياس الفولتية المُتولدة على أطراف ملفات الفولتية المنخفضة (LV winding)، وهذا الطريقة أكثر أماناً حيث أنه لا خوف من ظهور فولتيات مرتفعة على أطراف قياس الفولتية.

✓ **الأسلوب التصاعدي - Step-Up method:** وذلك بتطبيق الفولتية المترددة (AC voltage) على ملفات الفولتية المنخفضة (LV winding) و قياس الفولتية المُتولدة على أطراف ملفات الفولتية المرتفعة (HV winding)، وعادة ما يتم إستخدام هذه الأسلوب عند فحص المحولات ذات الملفات الثانوية الموصولة على شكل مثلث (Δ - Delta) أو المحولات ثلاثية الطور ثلاثية الملفات (Tertiary Windings Transformers) ولكن بالمقابل يُمكن إعتبار هذه الطريقة أقل

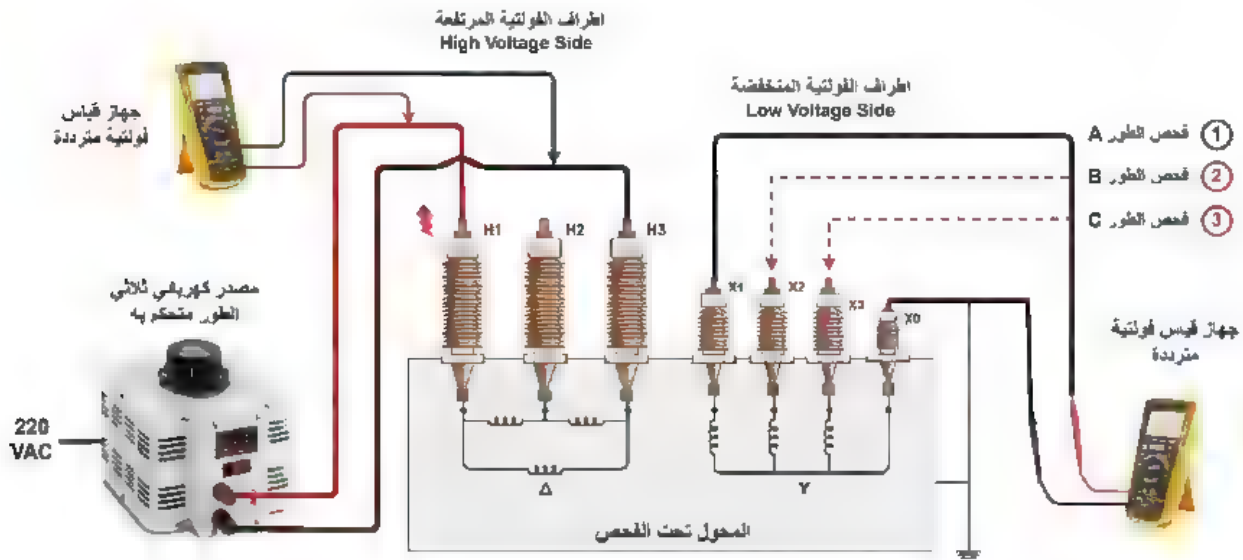
آماً نتيجة لإمكانية ظهور فولتيات مرتفعة على أطراف القياس الخاصة بملفات الفولتية المرتفعة (HV winding).

• المُعدات المُستخدمة بالفحص

- مصدر كهربائي (Power Supply): مصدر فولتية مترددة مُتحكم به (Regulated AC Power Supply) أو كما يُسمى (Variable AC Power Supply - Variac) أحادي الطور أو ثلاثي الطور ذو مستوى فولتية مناسب (150 – 300) فولت، كما يجب التأكد من أن هذا المصدر المُتحكم به مُعاير (Calibrated).
- جهاز قياس فولتية مترددة (AC) رقمي (Digital Voltmeter): ذو دقة عالية (high Accuracy) وكذلك ذو تدرج (Scale) مناسب لقيَم الفحص، كما يجب التأكد من أنه مُعاير (Calibrated).
- أسلاك توصيل (Test Wires) ومرابط (Clamps).

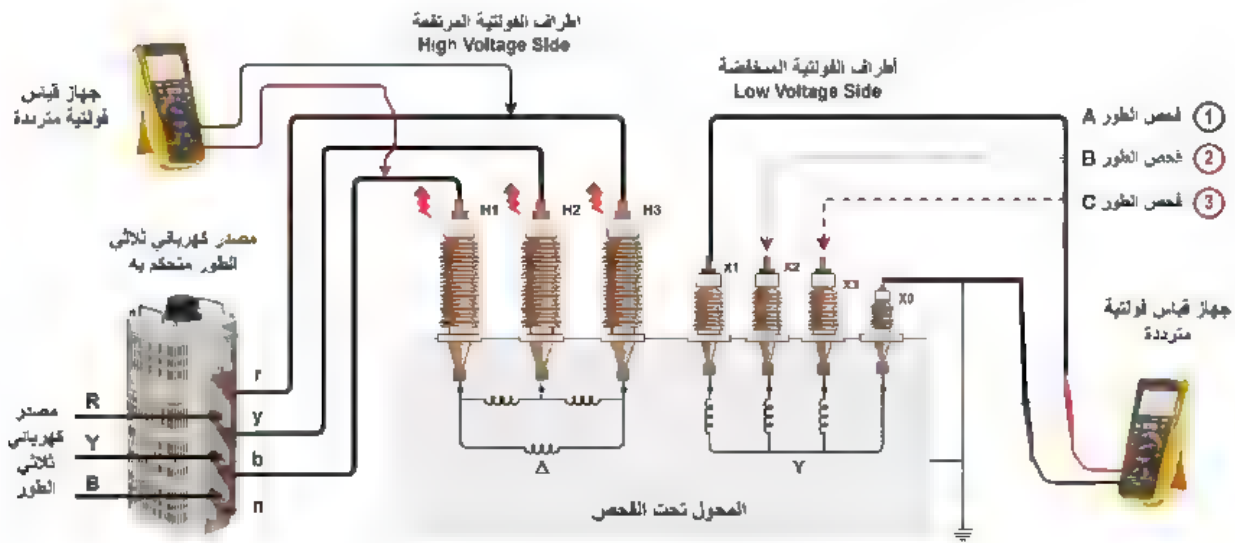
• توصيلة الفحص

- في حال كان المحول المُراد فحصه ثلاثي الأطوار (Three Phase) ذو ملفات ذات نقطة تعادل (Neutral point) يُمكن الوصول إليها (أي أنه موصول بطريقة النجمة خارجياً)؛ في هذه الحالة يُنصح باستخدام مصدر فولتية أحادي الطور (single phase) للفحص كما ويُمكن استخدام مصدر ثلاثي الطور حسب [IEEE, C57.12.90-2015] الشكل (4-8) يُبين توصيلة الفحص باستخدام مصدر فولتية أحادي الطور لمحول ذو مجموعة توصيل (Dyn1) كمثال.



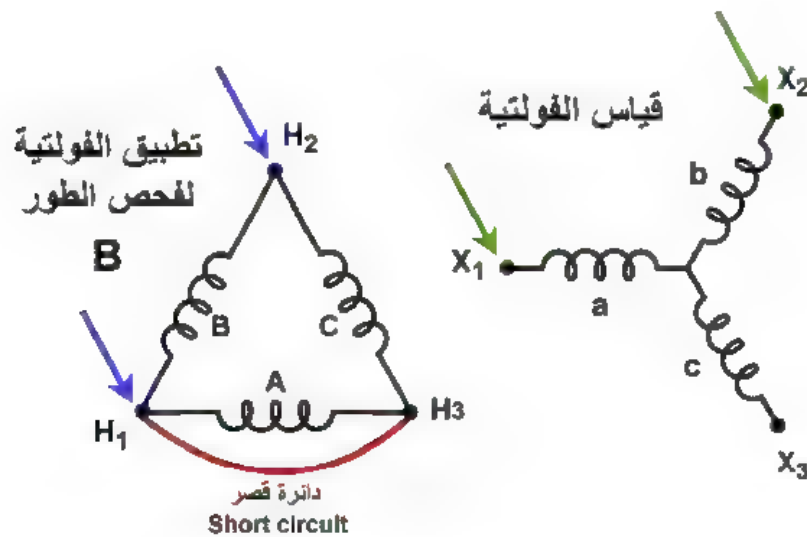
الشكل رقم (4-8)

الشكل (4-9) يُبين توصيلة الفحص باستخدام مصدر فولتية ثلاثي الطور لمحول ذو مجموعة توصيل (Dyn1) كمثال.



الشكل رقم (4-9)

في حال كان المحول المُراد فحصه ثلاثي الأطوار (Three Phase) ذو ملفقات ذات نقطة تعادل (Neutral point) لا يُمكن الوصول إليها (أي أنه موصول بطريقة النجمة داخلياً)؛ في هذه الحالة يُمكن إحراء الفحص باستخدام مصدر فولتية أحادي الطور (single phase) مع ضرورة عمل بعض الإجراءات كوضع وصلة قِصر لتكوين نقطة تعادل إفتراضية كما هو مُبين في الشكل (4-10).



الشكل رقم (4-10)

الشكل السابق يُبين توصيلة فحص الطور (B) لمحول ذو توصيلة ملفات (Dyn)، ولفحص باقي الأطوار يُمكن الرجوع للجدول (4-1)، والذي يوضح الأطراف الواجب قصرها والأطراف التي

يجب حقن الفولتية عليها وكذلك أطراف قياس الفولتية لهذا النوع من توصيلات المحولات، وللباقى مجموعات التوصيل يُمكن إيجاد المُلحق (4-3) في نهاية الفصل.

الجدول رقم (4-1)

الطور المُراد فحصه	الأطراف الواجب قَصْرُها	أطراف حقن الفولتية	أطراف قياس الفولتية
A	H1 - H2	H3 - H1	X2 - X1
B	H1 - H3	H1 - H2	X1 - X2
C	H1 - H3	H2 - H3	X1 - X3

ملحوظة (4-3): في حال كانت ملفات الفولتية المرتفعة موصولة على شكل نجمة (Star - Y) يجب إبقاء نقطة التعادل مفتوحة، أي الحقن يكون ثلاثي الأطوار بثلاثة أسلاك فقط (Three Phase Three Wires).



4.2 باستخدام أجهزة الفحص الحديثة؛ مثل جهاز (TESTRANO 600 by OMICRON) كما سيتم شرحه بالملحق رقم (4-1)، وجهاز (TTRU3 by MEGGER) كما سيتم شرحه في الملحق (4-2).

5. خطوات الفحص

بعد التعرف على فلسفة الفحص وطُرق إجراؤه والتوصيلات اللازمة لذلك، يُمكن البدء بخطوات الفحص كالآتي:

5.1 عزل المحول كهربائياً (Transformer De-energization) مع مراعاة تطبيق نظام (إقفال مصادر الطاقة ووضع لافتات عليها) أو ما يُسمى بنظام التقافل (Lock-out Tag-out LOTO).

5.2 عزل نظام مكافحة الحريق بالماء (أو كما يُسمى نظام تبريد خزان المحول ومنع إنتشار الحريق) الخاص بالمحول المُراد فحصه خشية عمل النظام بشكل خاطئ أثناء إجراء الفحص مما قد يؤدي لمخاطر القوس الكهربائي وما ينتوي عليه من مخاطر على الأشخاص أو المحول خاصة أثناء تطبيق الفولتية على المحول أو قد يؤدي الماء لتلف جهاز الفحص نفسه.

5.3 تطبيق كافة إجراءات السلامة الخاصة بإجراء الفحوصات الكهربائية المُضمنة في معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Recommended Practices for Safety in High-Voltage and High-Power Testing] والمعهد الوطني الأمريكي للمعايير [ANSI National Electrical Safety Code] ومُنظمة إدارة السلامة والصحة المهنية [OSHA Specifications for Accident Prevention Signs and Tags]

5.4 فتح أطراف الفولتية المنخفضة (LV side terminals) والفولتية المرتفعة (HV side terminals) وذلك بإزالة الموصلات عنها (Removing HV&LV Cables or Busbars) وكذلك الحال بنقطة التعادل (Neutral point) للمحول إن وجدت.

تحذير: يجب تأريض كوابل الفولتية المرتفعة إما عبر مُستعزلات التأريض الثابتة (Earthing Dis-connector) أو المتنقلة (Portable) قبل البدء بفك هذه الكوابل عن عوازل إختراق المحولات (Bushings)، وذلك لما قد تحويه من فولتية حثية (Induction voltage) ناتجة عن المُعدات أو الحطوط الهوائية (Overhead Lines - OHL) المجاورة للمحول المُراد فحصه والمشحونة بفولتيات مرتفعة.



5.5 تفريغ الشحنات المُخزنة بملفات المحول (Trapped Charges) قبل توصيل كوابل الفحص وذلك بعمل دائرة قِصْر للملفات (Short circuit) وتأريضها لمدة من الزمن وكذلك الحال بعد الإنتهاء من الفحص وقبل إزالة كوابل الفحص. بالإضافة إلى تأريض خزان المحول أثناء إجراء الفحص.

5.6 في حال سبق إجراء هذا الفحص إجراء أي من الفحوصات التي تعتمد على الفولتية الثابتة (DC) مثل فحص مقاومة العازل (Insulation resistance) أو فحص مقاومة الملفات (Winding Resistance) يجب إزالة المغناطيسية المُتبقيّة (De-magnetization) بالطرق الواردة في نهاية الفحصين سابقين الذكر (الفصل الثاني و الثالث)، وذلك لأن نتيجة هذا الفحص تتأثر بقيمة المغناطيسية المُتبقيّة وتشبّع القلب الحديدي للمحول.

5.7 مراعاة أن تكون باقي الملفات الخاصة بالمحول مفتوحة (Open circuit) أثناء الفحص.

5.8 عمل التوصيلة الخاصة بهذا الفحص كما هو مُبين في فقرة توصيلة الفحص والأشكال (4-8&9&10) السابقة والتي تُبين طريقة الفحص بالأسلوب التنازلي (Step-down) بعد التأكد من تنظيف أطراف المحول التي سيتم التوصيل عليها حتى لا تؤثر على قيمة الفحص.

5.9 تطبيق فولتية مترددة (AC voltage) على أطراف ملفات الفولتية المرتفعة (HV windings).

5.10 قياس الفولتية المُتولدة على أطراف ملفات الفولتية المنخفضة (LV windings) وذلك تبعاً لمجموعة التوصيل الخاصة بالمحول، الحدود (2-4) يُبين مجموعة التوصيل للمحول المُراد فحصه والأطراف التي يجب تطبيق الفولتية المترددة عليها والأطراف التي يجب قياس الفولتية عليها على إعتبار أن أسلوب الفحص المُتبع هو الأسلوب التنازلي (Step-down):

كما وتجدر الإشارة إلى أن الجدول التالي يَضم مجموعة التوصيل (Dyn1 و YNd11) وهي الأكثر شيوعاً كمحولات قدرة وتوزيع في الأردن بالإضافة إلى محولات ذات مجموعة التوصيل (Dd0 و Dd0-d0) سبق وأن تعاملت معها.

الجدول رقم (2-4)

مجموعة التوصيل	ملفات الفحص	أطراف حقن الفولتية	أطراف قياس الفولتية
YNd11	HV-LV Ynd11	U-N	u-w
		V-N	v-u
		W-N	w-v
Dyn1	HV-LV Dyn1	U-W	u-n
		V-U	v-n
		W-V	w-n
Dd0	HV-LV Dd0	U-V	u-v
		V-W	v-w
		W-U	w-u
Dd0-d0	HV-LV1 Dd0	U-V	u1-v1
		V-W	v1-w1
		W-U	w1-u1
	HV-LV2 Dd0	U-V	u2-v2
		V-W	v2-w2
		W-U	w2-u2
	LV1-LV2 dd0	u1-v1	u2-v2
		v1-w1	v2-w2
		w1-u1	w2-u2

*لذا في مجموعات التوصيل يرجى إيجاد الجدول بالملحق رقم (3-4)

5.11 قسمة الفولتية المُطبقة على ملفات الفولتية المرتفعة (HV) على الفولتية المُقاسة على ملفات الفولتية المنخفضة (LV) ومن ثم تصحيح النتيجة وفقاً للطريقة الواردة في فقرة تصحيح القيمة المُقاسة التي سيتم شرحها.

5.12 في حال كانت الملفات المفحوصة تتكون من عدة ملفات فرعية، أي في حالة وجود مُغَيِّر خطوة (Tap-changer) فإنه يتم تطبيق هذا الفحص على جميع الخطوات (Taps).

فائدة عملية: في حال كان مُغَيِّر الخطوة من نوع (De-energized Tap Changer -

DETCTap)، وبعد الإنتهاء من الفحص على جميع الخطوات (Taps) يجب إعادة المحول على الخطوة المرجعية (Reference Tap) أي التي كان عليها مُغَيِّر الخطوة (-Tap-changer) قبل الفحص أثناء التشغيل الطبيعي للمحول ومن ثم فحص المحول مرة أخرى وذلك للتأكد من عدم وجود فتح في الدائرة (Open Circuit) قبل كهربة المحول (Transformer energization).





فائدة عملية: يجب عمل تمرين لمُعَيِّر الخطوة من النوع (De-energized Tap Changer - DETC) على الأقل مرة واحدة سنوياً، وفي حل تعذر عمل هذا التمرين لظروف تشغيلية أو غيرها من الظروف فإنه لا يُنصح بتغيير وضعية مُعَيِّر الخطوة وإنما يجب تطبيق هذا الفحص على الخطوة المرجعية (Reference Tap) أي التي كان عليها مُعَيِّر الخطوة أثناء التشغيل الطبيعي فقط خوفاً من إحداث عطل في مُعَيِّر الخطوة بحن في غنى عنه.

6. تصحيح القيمة المُقاسة

قبل الخوض في تفاصيل تصحيح القيمة المُقاسة وحب التنويه إلى بعض المصطلحات الخاصة بهذا الفحص:

- ✓ نسبة الفولتية المُقاسة للمحول (Measured Transformer Voltage Ratio - TVR)، وهي النسبة التي يتم قياسها بواسطة هذا الفحص.
- ✓ نسبة الفولتية الموجودة على لوحة الإسم للمحول (Transformer Nameplate Voltage Ratio - TNR)، وهي النسبة المُضمنة في لوحة البيانات للمحول (Nameplate).
- ✓ نسبة الفولتية المتوقعة من النسبة الموجودة على لوحة الإسم (Expected Measured Transformer Voltage Ratio - ETVR)، وهي النسبة التي يتم إحسابها بالإعتماد على قيمة (TNR) الموحدة على لوحة البيانات للمحول (Nameplate) وذلك لأغراض المقارنة بالقيمة المُقاسة (TVR).
- ✓ نسبة عدد لفات المحول (Transformer Turns Ratio - TTR)، وهي النسبة المُستخرجة من الفحوصات السابقة للمحول مثل فحوصات القبول المصنعية (FAT) والموقعية (SAT) أو الفحوصات الروتينية السابقة

• مقارنة القيمة المُقاسة (TVR) بالقيمة المثبتة على لوحة البيانات للمحول (TNR)

في هذا الفحص يتم قياس نسبة الفولتية للمحول (TVR) وتكون هذه النسبة مساوية للنسبة الموحدة على لوحة البيانات (TNR) للمحولات ذات مجموعات التوصيل (Dd أو Yy) بحيث يُمكن مقارنة القيمة المُقاسة بالقيمة المثبتة على لوحة البيانات للمحول (Nameplate) مباشرة، أما لباقي مجموعات التوصيل للمحولات مثل (Dy أو Yd أو Zig-zag) فإن قيمة نسبة الفولتية المُقاسة (TVR) يتم مقارنتها بالنسبة المُتوقعة لنسبة الفولتية (ETVR) والتي يتم إحسابها بواسطة المعادلة التالية وبالإعتماد على نسبة الفولتية الموجودة على لوحة الإسم (TNR):

$$ETVR = k * TNR \quad (4.3)$$

حيث:

ETVR : قيمة نسبة الفولتية المُتوقعة للمحول.

TNR : قيمة نسبة الفولتية الموجودة على لوحة الاسم للمحول.

k : معامل يعتمد على توصيلة ملفات المحول ويمكن معرفة قيمته بالإعتماد على الجدول (4-3).

الجدول رقم (4-3)

مجموعة التوصيل	قيمة المعامل K	مجموعة التوصيل	قيمة المعامل K
Dd	1	Yz	$\sqrt{3}/2$
Dy	$\sqrt{3}$	YNz	$\sqrt{3}/2$
Dyn	$\sqrt{3}$	Yzn	$\sqrt{3}$
Dz	1.5	YNzn	$\sqrt{3}$
Dzn	1.5	Zd	1
Yd	$\sqrt{3}/2$	ZNd	$2/3$
YNd	$1/\sqrt{3}$	Zy	$\sqrt{3}/2$
Yy	1	ZNy	$1/\sqrt{3}$
YNy	1	Zyn	1
Yyn	1	ZNyn	1
YNyn	1		

مثال: لو أردنا إجراء هذا الفحص على محول ذو مجموعة توصيل (Dyn1) وكانت قيمة نسبة الفولتية المُثبتة على لوحة البيانات للمحول (TNR) مساوية لـ (2.1739) أي على إعتبار أن المحول يقوم بتحويل (15kv) إلى (6.9kv)، فإن القيمة المتوقع الحصول عليها بإجراء هذا الفحص (ETVR) وفقاً للمعادلة والجدول السابقان تكون مساوية لـ (3.765). بعد ذلك يتم إجراء هذا الفحص ومقارنة نسبة الفولتية المُقاسة من خلال الفحص (TVR) و نسبة الفولتية المُتوقعة المحتسبة (ETVR).

• مقارنة القيمة المُقاسة (TVR) بقيمة (TTR) من الفحوصات السابقة

عند قياس قيمة نسبة الفولتية (TVR) لأغلب المحولات فإنها تكون تقريباً مساوية لقيمة نسبة لعات المحول (TTR)، ولكن لبعض المحولات يجب حساب قيمة نسبة عدد لعات المحول (TTR_{Cal}) بالإعتماد على قيمة نسبة الفولتية المُقاسة (TVR) وذلك ليتسنى لنا مقارنتها بقيمة نسبة عدد اللغات (TTR) الموجودة بالفحوصات السابقة مثل فحوصات القبول القصصية (FAT) والموقعية (SAT) أو الفحوصات الروتينية وذلك بواسطة المعادلة التالية:

$$TTR_{Cal} = k * TVR \quad (4.4)$$

حيث:

: قيمة نسبة الفولتية للمحول (القيمة المُقاسة).

TVR

: قيمة نسبة عدد لفات المحول.

TTR_{cal}

: معامل يعتمد على توصيلة ملفات المحول ويُمكن معرفة قيمته بالإعتماد على

k

الجدول (4-4).

الجدول رقم (4-4)

مجموعة التوصيل	قيمة المعامل K
Dz	3/2
Yzn	1/2
Yd	2/3
YNzn	1/2
Zd	2/3
ZNy	2
Zy	4/3
ZNy	2

مثال: لو أردنا إجراء هذا الفحص على محول ذو مجموعة توصيل (Yd1) وكانت قيمة نسبة الفولتية المُقاسة من خلال هذا الفحص (TVR) مساوية لـ (2.5)، ولغايات مقارنة هذه القيمة بقيمة نسبة عدد لفات المحول (TTR) من الفحوصات السابقة لا بُد من احتساب قيمة نسبة عدد اللفات (TTR_{cal}) بالإعتماد على قيمة نسبة الفولتية المُقاسة من خلال هذا الفحص (TVR) وذلك بتطبيق المعادلة (4.4) والرجوع للجدول (4-4) حيث أن قيمة نسبة عدد اللفات (TTR_{cal}) ستساوي (1.67) لهذا المحول ذو مجموعة التوصيل (Yd1). بعد ذلك يتم مقارنة قيمة نسبة عدد اللفات المحتسبة (TTR_{cal}) بقيمة نسبة عدد اللفات من الفحوصات السابقة (TTR).

7. تحليل نتائج الفحص

بعد تصحيح القيم المُقاسة وفقاً لما تم شرحه سابقاً، يتم تحليل نتائج الفحص بعدة طرق كالآتي:

7.1 الطريقة الأولى: مقارنة نتائج الفحص (TVR) بالقيمة الموجودة على لوحة البيانات (TNR) المُثبتة

على المحول مباشرة أو بعد تصحيحها واستخراج قيمة نسبة الفولتية المتوقعة (ETVR) كما ذُكر سابقاً في فقرة تصحيح القيمة المقاسة.

حيث أن قيمة التباين المسموح بها هي خمسة بال عشرة بالمئة (0.5%) كما ورد في المعيار الصادر عن اللجنة الكهروتقنية الدولية [IEC, 60076-1 2011] والمعيار الصادر عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE, C57.152-2013].

7.2 الطريقة الثانية: مقارنة نتائج الفحص (TVR) بنتائج سابقة للمعدة (TTR) (نتائج الفحوصات المصنعية (FAT) أو الموقعية (SAT) أو الروتينية) وذلك بعد إستخراج قيمة (TTR_{Cal}) بالإعتماد على قيمة نسبة الفولتية المقاسة (TVR) كما ذكر سابقاً في فقرة تصحيح القيمة المقاسة. حيث أن قيمة التباين المسموح بها بعد المقارنة بقيم الفحوصات السابقة هي خمسة بال عشرة بالمئة (0.5%).

7.3 الطريقة الثالثة: مقارنة نتائج الفحص بنتائج فحص لمعدة مُشابهة تماماً (Twin or Sister).

7.4 الطريقة الرابعة: مقارنة نتائج الفحص بين الأطوار.

إن هذا الفحص يُمكنه إعطاء مؤشر عن وجود قصر أو قطع كلي (Open circuit or Crack) في الملفات داخل المحول ولكنه لا يقوم بتحديد مكان العطل داخل الملف مما يدفعنا للإستعانة بفحوصات أخرى من شأنها الكشف عن حالة المحول الداخلية وقد يصل الأمر إلى فتح الخزان الخاص بالمحول (De-Tanking) لمعرفة مكان العطل ومسبباته، كما وتُجدر الإشارة إلى جدول أوردته بعض المراجع يُساعد على تحديد الملف الذي يحوي العطل للمحولات ثلاثية الاطوار ذات ثلاث ملفات (Three Phase Tertiary Windings) بالإعتماد على نمط مخرجات هذا الفحص.

الجدول رقم (4-5)

ملفات تطبيق الفولتية	ملفات قياس الفولتية		التشخيص
	ملف الفولتية المنخفضة الأول LV	ملف الفولتية المنخفضة الثاني TV	
ملف الفولتية المرتفعة HV	نتيجة فحص (TVR) غير مقبولة	نتيجة فحص (TVR) مقبولة	إمكانية وجود عطل في ملفات الفولتية المنخفضة الأول LV
ملف الفولتية المرتفعة HV-	نتيجة فحص (TVR) مقبولة	نتيجة فحص (TVR) غير مقبولة	إمكانية وجود عطل في ملفات الفولتية المنخفضة الثاني TV-
ملف الفولتية المرتفعة HV	نتيجة فحص (TVR) غير مقبولة	نتيجة فحص (TVR) غير مقبولة	إمكانية وجود عطل في ملفات الفولتية المرتفعة HV

حالة خاصة: في حال كان مُغيّر الخطوة (Tap-changer) مُنْتَبَت على ملفات الفولتية المنخفضة للمحول على غير العادة ونظراً لقلة عدد ملفات الفولتية المنخفضة، فإن بعض الخطوات (Taps) قد لا تحمل نفس العدد من اللفات أي أن التغيّر في الفولتية بين الخطوات (Taps) غير مُتماثل، و بالتالي فإن النسبة لكل خطوة (Tap) قد لا تتوافق بشكل تام مع القيمة المُثبتة على لوحة بيانات المحول أي أن نسبة التباين تجاوزت النسبة المسموح بها وهي خمسة بال عشرة بالمئة (0.5%) المُشار إليها سابقاً. لذلك و للتأكد من سلامة المحول نلجأ للحلول التالية في تحليل قيم الفحص:

- ✓ مقارنة القيمة المُقاسة بين الأطوار.
- ✓ حساب قيمة التباين بين نتيجة الفحص للخطوتين (Taps) الأعلى و الأدنى فقط على أن لا تزيد عن (0.5%) عن قيمة الفحوصات المصنعية (FAT) أو الموقعية (SAT) أو الروتينية أو القيمة الموجودة على لوحة البيانات للمحول.

8. العوامل المؤثرة على نتيجة الفحص

8.1 توصيل الملفات الداخلي للمحول (Winding Configuration)

مجموعة التوصيل للمحول من الأمور التي تؤثر على نتيجة الفحص وتؤدي إلى ظهور نتائج خاطئة في حال عدم أخذها بعين الاعتبار، لذلك بعد الإنتهاء من الفحص يجب مراعاة طريقة توصيل الملفات وذلك لتصحيح القيمة بالشكل الصحيح كإستخراج قيمة الـ (ETVR) أو تصحيح قيم الفحص المُقاسة و إستخراج قيمة (TTR) كما تم شرحه في فقرة تصحيح القيمة المُقاسة قبل عمل مقارنة بين القراءات السابقة والحالية للفحص أو ما يُسمى بعملية تحليل النتائج.

8.2 التشبّع العميق للقلب الحديدي (Iron Core deep saturation)

إن القيام بفحوصات المحول التي تعتمد في طبيعتها على تطبيق فولتية أو تيار ثابت على المحول (DC) كفحص مقاومة ملفات المحول (WRM) وفحص مقاومة العزل (IR) من شأنه إحداث تشبّع في القلب الحديدي للمحول أو ما يُسمى بمغنطة القلب الحديدي، وهذا بدوره يؤدي لزيادة تيار التهيج المار في الملفات عند إجراء فحص نسبة عدد اللفات (TTR) ويؤثر على نتيجة الفحص النهائية، ولتجنّب تأثير تشبّع القلب الحديدي للمحول على نتيجة هذا الفحص (TTR) فإنه يُنصح بالآتي:

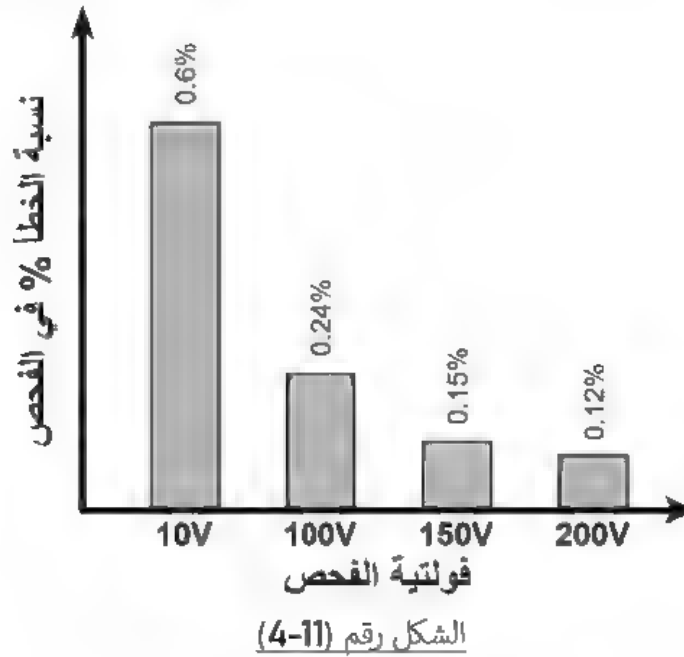
- ✓ عمل الفحوصات التي تؤدي إلى تشبّع القلب الحديدي بعد فحص نسبة عدد لفات المحول (TTR).
- ✓ إزالة مغنطة القلب الحديدي (De-magnetization) بعد الإنتهاء من فحوصات التيار أو الفولتية الثابتة (DC) وقبل البدء بفحص نسبة عدد اللفات (TTR) بإحدى الطرق المذكورة في الفصول السابقة.

8.3 التوصيل الخاطئ لأطراف قياس الفولتية (Wrong connection)

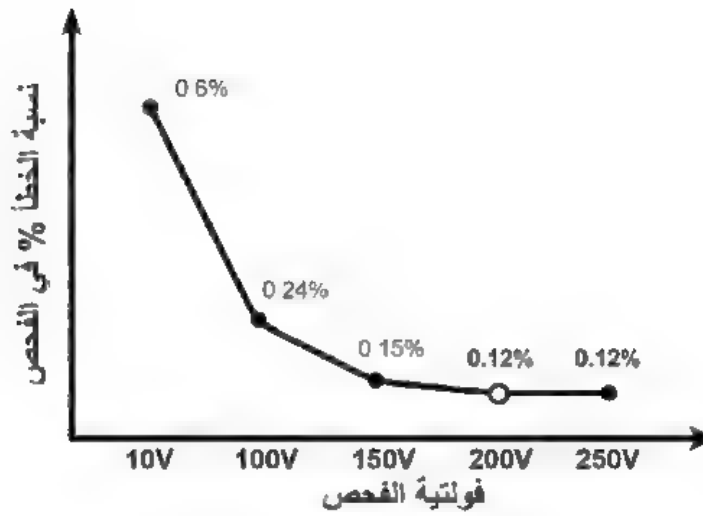
هذه النوع من الأخطاء غالباً ما يحدث عند وصل جهاز قياس الفولتية على أطراف ملفات المحول الثانوية غير المشحونة بدلاً من الملفات المشحونة عند عمل الفحص لكل طور على حدا (Per phase measurements)، لذلك يجب تحديد أطراف المحول التي يجب تطبيق الفولتية عليها والأطراف التي يجب قياس الفولتية عليها مسبقاً قبل البدء بالفحص وذلك بالإعتماد على الجدول في الملحق رقم (4-3) وفقاً لمجموعة التوصيل الخاصة بالمحول تحت الفحص.

8.4 فولتية الفحص أو كما تُسمى التهيج (Excitation voltage)

إن الفولتية المُتولدة على أطراف الملفات الثانوية نتيجة للفولتية المُطبقة على الملفات الابتدائية تتناسب طردياً مع كمية الفيض المشترك بين الملفات (Mutual Flux)، ولزيادة قيمة هذا الفيض المشترك يجب زيادة قيمة فولتية الفحص (التهيج)، حيث أنه وبالإعتماد على ما دُكر سابقاً فإن نسبة الخطأ في قيمة نسبة فولتية المحول (TVR) تتناسب عكسياً مع قيمة فولتية الفحص (التهيج) كما هو مُبين بالرسم البياني الموضح في الشكل (4-11) لمحول بالمواصفات التالية (Dyn1 15/6.9kv):



ولكل محول هنالك قيمة فولتية عتبة (threshold) لفولتية الفحص (التهيج)، عندها تكون نسبة الخطأ في قيمة الفحص أقل ما يُمكن وبدأت بالثبات كما هو مُبين بالشكل (4-12) لمحول بالمواصفات التالية (Dyn1 20/6.9kv) حيث قيمة فولتية العتبة هي تقريباً (200 V).



الشكل رقم (4-12)

مما سبق يُمكن ملاحظة أثر زيادة قيمة فولتية الفحص على تقليل نسبة الخطأ في القياس، لذلك لا يُنصح بإجراء هذا الفحص باستخدام فولتيات متدنية.

8.5 طريقة الفحص ثلاثية الطور (Three Phase testing) أو أحادية الطور (Single Phase testing)

من الشائع عند القيام بهذا الفحص استخدام مصدر أحادي الطور (Single Phase Source) بحيث يتم القياس لكل طور على حدة، ولكن عند القيام بهذه الطريقة يُمكن مواجهة التحديات التالية:

- ✓ تأثير مقدار فولتية الفحص (Excitation test voltage) على نتيجة الفحص، حيث أنه كلما قلت فولتية الفحص كلما زادت نسبة الخطأ، أما في حال استخدام الطريقة ثلاثية الطور (Three phase testing) فإن تأثير مستوى فولتية الفحص على نسبة الخطأ يقل.
- ✓ تأثير خسائر التهييج (Excitation Loss) على نتيجة الفحص.
- ✓ ضعف الفيض المشترك بين الملفات الابتدائية والثانوية مما يؤثر على نتيجة الفحص.

و للتقليل من تأثير هذه المعوقات يتم اللجوء إلى الحلول التالية:

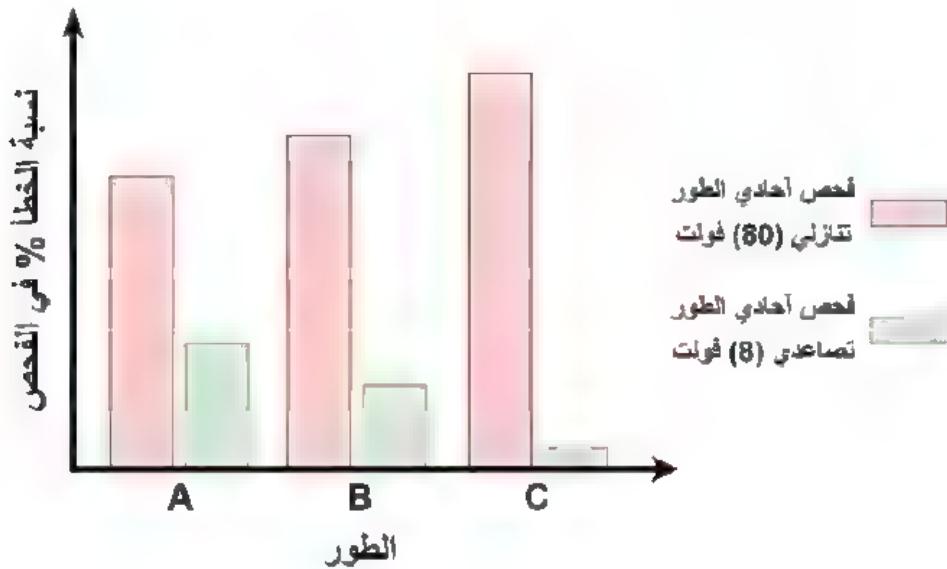
- ✓ رفع قيمة فولتية الفحص أو ما يُسمى بفولتية التهييج (Excitation test voltage).
- ✓ استخدام أسلوب الفحص (Step-Up)، أي تطبيق فولتية الفحص على جهة ملفات الفولتية المنخفضة (LV windings) والقياس جهة ملفات الفولتية المرتفعة (HV winding).
- ✓ حقن الفولتية بين (Line to Line) عوضاً عن (Line to Neutral).
- ✓ الفحص بالطريقة ثلاثية الطور (Three Phase Testing) أي باستخدام مصدر فولتية ثلاثي الطور.

8.6 توصيلة الملفات على شكل مثلث – Delta Connected Winding

عند إجراء فحص نسبة عدد الملفات (TTR) وكما تم شرحه مسبقاً في فقرة فلسفة الفحص فإن المحول يكون مفتوح الأطراف (Open circuit) أثناء الفحص أي أنه غير مرتبط بحمل على دائرته الثانوية (No-Load) لأسباب تم ذكرها أيضاً، ولكن في حال أردنا فحص محول وكانت ملفاته الثانوية موصولة على شكل مثلث فإنه في هذه الحالة ونظراً للدائرة المغلقة للملفات الثانوية (Delta connection) فإن ذلك من شأنه عمل حمل على الملفات الثانوية كما وأنها غير مفتوحة الأطراف وظهور تيارات دوارة (Circulating currents) مما يزيد قيمة الصياعات ويؤثر على نتيجة هذا الفحص (TTR test).

لذلك وللتخلص من تأثير الملفات الثانوية الموصولة على شكل مثلث (Delta) فإنه يُنصح بالآتي:

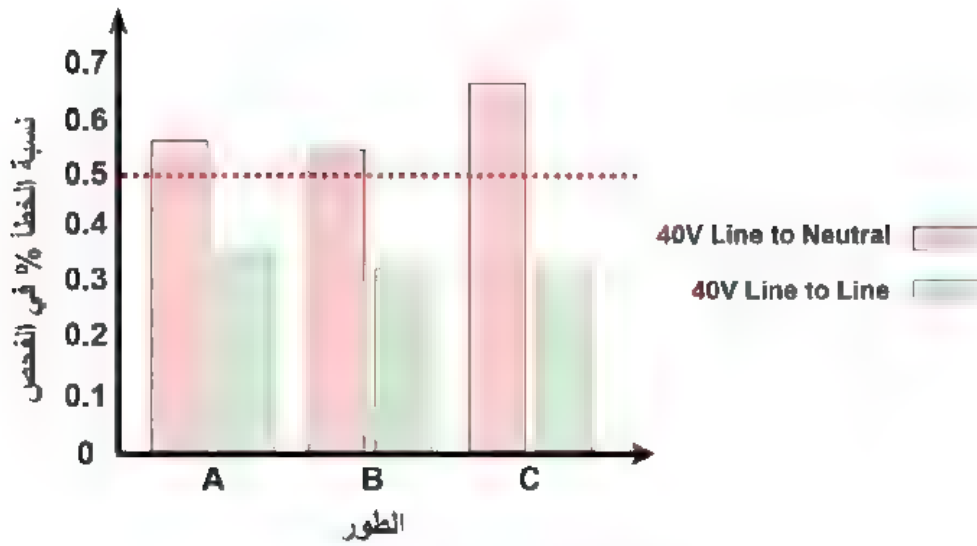
✓ استخدام أسلوب الفحص التصاعدي (Step-Up)، أي تطبيق فولتية الفحص على حبة ملفات الفولتية المنخفضة (LV windings) الموصولة على شكل مثلث (Delta) والقياس حبة ملفات الفولتية المرتفعة (HV winding). ويُبين الشكل (4-13) تأثير أسلوب الفحص فيما إذا كان تصاعدي أو تنازلي على نسبة الخطأ في الفحص.



الشكل رقم (4-13)

✓ الفحص بالطريقة ثلاثية الطور (Three Phase Testing) أي باستخدام مصدر فولتية ثلاثي الطور.

✓ حقن الفولتية بين (Line to Line) عوضاً عن (Line to Neutral). ويُبين الشكل (4-14) تأثير حقن الفولتية بين الأطوار أو بين الطور ونقطة التعادل على نسبة الخطأ في الفحص.



الشكل رقم (4-14)

8.7 تأريض طرف حقن الفولتية

عند تطبيق هذا الفحص باستخدام مصدر فولتية مترددة أحادي الطور يجب تأريض طرف نقطة التعادل (Neutral point) كما هو مبين في توصيلة الفحص الموضحة في الشكل (4-8).

9. فحوصات إضافية داعمة

تُعتبر المحولات من المعدات ذات الأهمية القصوى في المنظومة الكهربائية لما لها من دور في ديمومة سريان التيار الكهربائي عن طريق ربط عناصر المنظومة الكهربائية جميعها بالإضافة إلى تكلفتها المادية المرتفعة، لذلك لا يُمكن الإعتماد على فشل فحص واحد لتقييم حالة المحول والبدء بعمل الإجراءات التصحيحية لهذا المحول، بل يجب عمل فحوصات أخرى من شأنها تأكيد ما تم الكشف عنه في هذا الفحص وتحديد نوع العطل بالصبط ثم بعد ذلك يُصار لعمل الإجراءات التصحيحية اللازم لهذا المحول والذي قد يتطلب التواصل مع مُصنِّع هذا المحول.

فعند إجراء فحص نسبة عدد اللغات (TTR) وكانت نتائج الفحص غير مُرضية، لا بُد من إجراء بعض الفحوصات الأخرى للتأكد من وجود هذه الأعطال قبل البدء بالإجراءات التصحيحية فهناك عدة فحوصات من شأنها الكشف عن وجود قطع أو قِصر بين ملفات المحول بحساسية تفوق نظيرتها لهذا الفحص حيث يمكن الاستعانة بفحص تيار التهيج (Excitation current) للكشف عن وجود قِصر بين لفات المحول، وكذلك يُمكن الاستعانة بفحص مقاومة الملفات (Winding resistance) للكشف عن وجود قطع كُلي أو جزئي في ملفات المحول، وأيضاً فحص تحليل الاستجابة الترددية المُسحي (Sweep frequency response analysis SFRA) للكشف عن حالتي القطع والقِصر بين الملفات بالإضافة لأعطال القلب الحديدي للمحول (Iron Core).

10. أمثلة على نتائج فحوصات مصنعية

10.1 المثال الأول: الشكل (4-15) يُبين قيم فحص نسبة الفولتية (TVR) مصنعي (FAT) لمحول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (Three Phase Two Windings) موصل بطريقة (YNd11) ذو مُغَيّر خطوة من نوع (DETC or OCTC).

Acceptance Test Certificates		MEASUREMENT OF VOLTAGE RATIO AND CHECK OF VECTOR GROUP		Page No			
Customer		Standard	IEC 60076-1 § 10.3	Serial No			
Rated Power (MVA)	10.3 / 135	Rated voltage (kV)	420 / 15	Report No			
				Vector Group			
Winding pair HV / LV		Check of Vector Group		YNd11 <input checked="" type="checkbox"/>			
Tap No	Calculated	Measured	Error	Measured	Error	Measured	Error
HV / LV	Ratio	H1+H2 X1X3	%	H2H3 X2X1	%	H1H3 X3X2	%
1	1.122	5.133	0.21	5.133	0.21	5.133	0.21
2	5.065	5.071	0.16	5.07	0.16	5.073	0.16
3	5.002	5.010	0.16	5.013	0.16	5.010	0.16
4	4.943	4.943	0.00	4.943	0.00	4.943	0.00
5	5.883	5.889	0.12	5.889	0.12	5.889	0.12
6	4.822	4.833	0.23	4.833	0.23	4.833	0.23
7	4.767	4.774	0.15	4.774	0.15	4.774	0.15
8	4.701	4.715	0.30	4.715	0.30	4.715	0.30
9	4.637	4.645	0.17	4.645	0.17	4.645	0.17
10	4.575	4.580	0.11	4.580	0.11	4.580	0.11
11	4.510	4.508	-0.04	4.508	-0.04	4.508	-0.04
12	4.463	4.471	0.18	4.471	0.18	4.471	0.18
13	4.402	4.400	-0.05	4.400	-0.05	4.400	-0.05
14	4.340	4.348	0.14	4.348	0.14	4.348	0.14
15	4.280	4.289	0.21	4.289	0.21	4.289	0.21
16	4.220	4.223	0.07	4.223	0.07	4.223	0.07
17	4.160	4.172	0.29	4.172	0.29	4.172	0.29

الشكل رقم (4-15)

10.2 المثال الثاني: الشكل (4-16) يُبين قيم فحص نسبة الفولتية (TVR) مصنعي (FAT) لمحول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (Three Phase Two Windings) موصل بطريقة (Dyn1) ذو مُغَيّر خطوة من نوع (OLTC).

Acceptance
Test Certificate

Customer		MEASUREMENT OF VOLTAGE RATIO AND CHECK OF VECTOR GROUP		Page No
		VECTOR GROUP		Serial No
		Standard	IEC 60076-1 § 10.3	Report No
Rated Power(MVA)	24 / 30	Rated Voltage(kV)	15 / 6.9	Vector Group
				Dyn1

Winding pair HV / LV

Check of Vector Group

Dyn1

☒

Tap No	Calculated Ratio	Measured Ratio	Error %	Measured Ratio	Error %	Measured Ratio	Error %
HV / LV		H1+H2 X2X3	%	H2H3 X3X1	%	H1H3 X1X2	%
1	1.122	5.133	0.21	5.133	0.21	5.133	0.21
2	5.065	5.071	0.16	5.07	0.16	5.073	0.16
3	5.002	5.010	0.16	5.013	0.16	5.010	0.16
4	4.943	4.943	0.00	4.943	0.00	4.943	0.00
5	5.883	5.889	0.12	5.889	0.12	5.889	0.12
6	4.822	4.833	0.23	4.833	0.23	4.833	0.23
7	4.767	4.774	0.15	4.774	0.15	4.774	0.15
8	4.701	4.715	0.30	4.715	0.30	4.715	0.30
9	4.637	4.645	0.17	4.645	0.17	4.645	0.17
10	4.575	4.580	0.11	4.580	0.11	4.580	0.11
11	4.510	4.508	-0.04	4.508	-0.04	4.508	-0.04
12	4.463	4.471	0.18	4.471	0.18	4.471	0.18
13	4.402	4.400	-0.05	4.400	-0.05	4.400	-0.05
14	4.340	4.348	0.14	4.348	0.14	4.348	0.14
15	4.280	4.289	0.21	4.289	0.21	4.289	0.21
16	4.220	4.223	0.07	4.223	0.07	4.223	0.07
17	4.160	4.172	0.29	4.172	0.29	4.172	0.29

الشكل رقم (4-16)

10.3 المثال الثاني: الشكل (4-17) يُبين قِيم فحص نسبة الفولتية (TVR) مَصْبي (FAT) لمحول ثلاثي الأطوار ثلاثي الملفات (Three Phase Tertiary Windings) موصول بطريقة (Dd0-d0) ذو مُغَيَّر خطوة من نوع (OCTC أو DETC).

Measurement of voltage ratio and check of phase displacement					
1. HV-LV1 voltage ratio measurement					
Tapping	HV (V)	LV (V)	Voltage ratio error (%)		
			$\frac{U_{1000V}}{U_{2000V}}$	$\frac{U_{1050V}}{U_{2050V}}$	$\frac{U_{1100V}}{U_{2100V}}$
1	21000	11500	0.28	0.23	0.28
2	20500		0.19	0.17	0.21
3	20000		0.20	0.19	0.20
4	19500		0.06	0.03	0.06
5	19000		0.04	0.03	0.05
2. Check of phase displacement of- HV-LV1: Dd0					
3. HV-LV2 voltage ratio measurement					
Tapping	HV (V)	LV2 (V)	Voltage ratio error (%)		
			$\frac{U_{1000V}}{U_{2000V}}$	$\frac{U_{1050V}}{U_{2050V}}$	$\frac{U_{1100V}}{U_{2100V}}$
1	21000	11500	0.29	0.28	0.30
2	20500		0.23	0.21	0.22
3	20000		0.16	0.14	0.16
4	19500		0.06	0.04	0.05
5	19000		0.02	0.03	0.03
4. Check of phase displacement of- HV-LV2 Dd0					
5. LV1-LV2 voltage ratio measurement					
Tapping	LV1 (V)	LV2 (V)	Voltage ratio error (%)		
			$\frac{U_{1000V}}{U_{2000V}}$	$\frac{U_{1050V}}{U_{2050V}}$	$\frac{U_{1100V}}{U_{2100V}}$
/	11500	11500	0.06	0.04	0.08
6. Check of phase displacement of- LV1-LV2: dd0					
Test results		Measured values meet the relevant requirement			

الشكل رقم (4-17)

الملحق (4-1)

تنويه

يضم هذا الملحق خطوات الفحص وتوصيلاته بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسّط. إستناداً على الخبرة بالتعامل مع هذه الأجهزة، وتُجدر الإشارة أنه في حال إستخدام جهاز الفحص المُشار إليه في هذا الملحق لا يجب الإعتماد على هذا الملحق فقط، بل يجب قراءة الكُتبيات التفصيلية الخاصة بهذا الجهاز والمزودة بواسطة الشركة المُصنعة للجهاز جيداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية و السلامة العامة

فحص نسبة عدد لفات المحول بإستخدام جهاز TESTRANO 600 by OMICRON



الشكل رقم (4-1-1)

• مواصفات الجهاز: حسب الـ (TESTRANO600 Brochure)

- فولتية المدخل الاسمية : 100/240 V, 50/60 Hz
- فولتية المدخل المسموح بها : 85-264 V, 45-65 Hz
- نطاق تيار/فولتية المخرج : حسب الجدول التالي.

عدد الأطوار	نطاق الفولتية (AC)	التيار الأقصى (AC)
ثلاثي الأطوار	0 ... 230 V	100 mA
	0 ... 80 V	16 A
	0 ... 40 V	33 A
آحادي الطور	0 ... 240 V	16 A
	0 ... 120 V	33 A

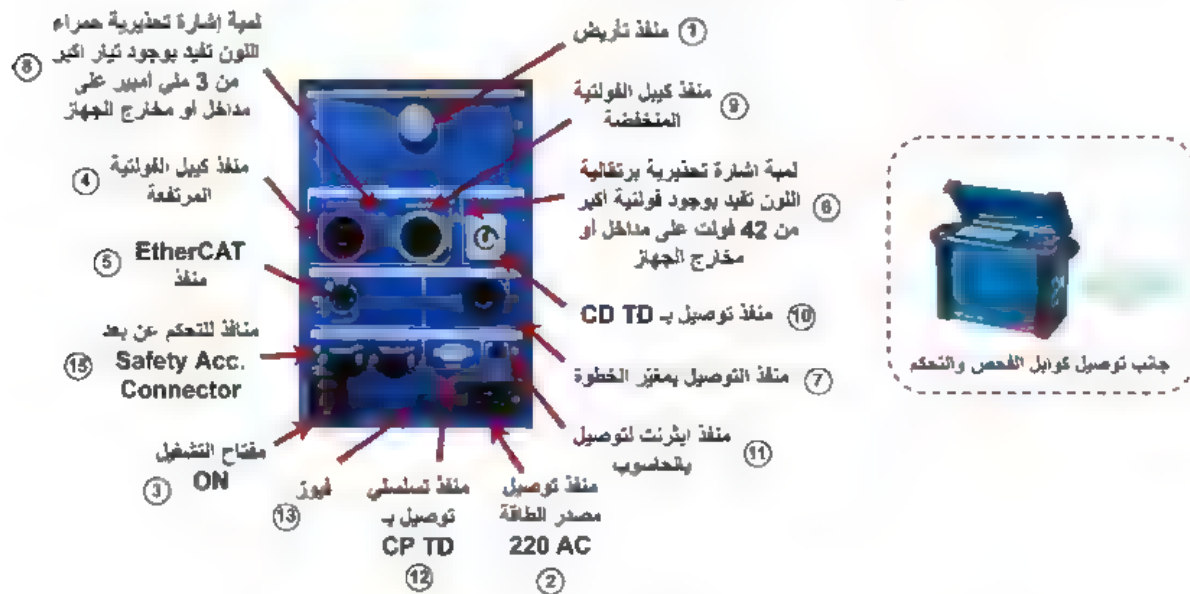
- دقة النطاق المُقاس : حسب الجدول التالي.

النطاق	دقة القراءات
1:1 10	0.03% rd + 0.043% range
1:10 100	0.027% rd + 0.043% range
1:100 1000	0.027% rd + 0.043% range
1:1000 10000	0.027% rd + 0.043% range

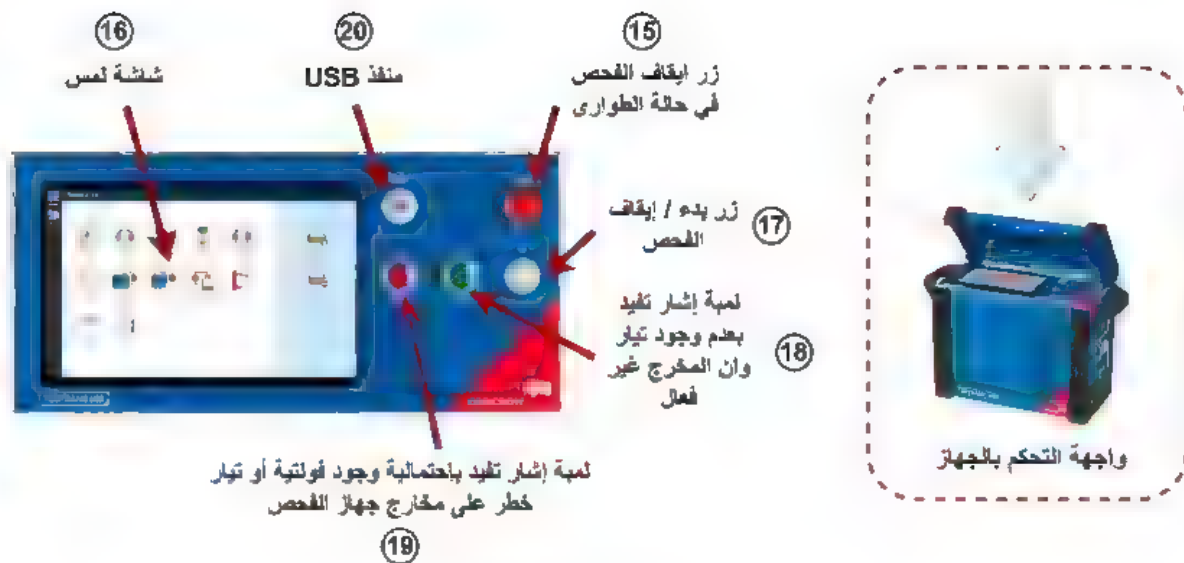
- البيئة التشغيلية المحيطة : 14° F to 131° F (-10° C to 55° C) RH to 95%, Non condensing
- البيئة التخزينية المحيطة : -22 to 158° F (-30 to +70°C)
- أبعاد الجهاز : 580 x 386 x 229 mm
- وزن الجهاز : 45.5 lb. (20.6 kg), with display

• خطوات الفحص بواسطة هذا الجهاز:

1. التأكد من تطبيق الخطوات (5.1 إلى 5.5) الواردة في فقرة خطوات الفحص من فصل فحص سبة عدد اللغات.
2. التأكد من أن الدائرة المراد فحصها غير مُكهربة وعدم وجود احتمالية لكهربتها أثناء الفحص
3. تجنب لمس دائرة الفحص أثناء إجراء الفحص أو بعده، إلا بعد التأكد من عدم وجود فولتية وأن الملفات تم تفريغها من الشحنات المخزنة تماماً.
4. التأكد من أن أسلاك التوصيل الخاصة بجهاز الفحص (Test leads) وكذلك المشابك الخاصة بها (Clamps) في حالة جيدة وغير متسحة ولا تعالي من أية أضرار فيزيائية كالشقوق أو الكسور.
5. التأكد من أن جهاز الفحص المراد استخدامه مُعاير (Calibrated).
6. قبل البدء بالفحص يُفَضَّل التعرف على أجزاء جهاز الفحص من شاشة ومنافذ وأزرار ومفاتيح تحكم ولمبات إشارة كما هو مبين بالأشكال (4-1-2&3).



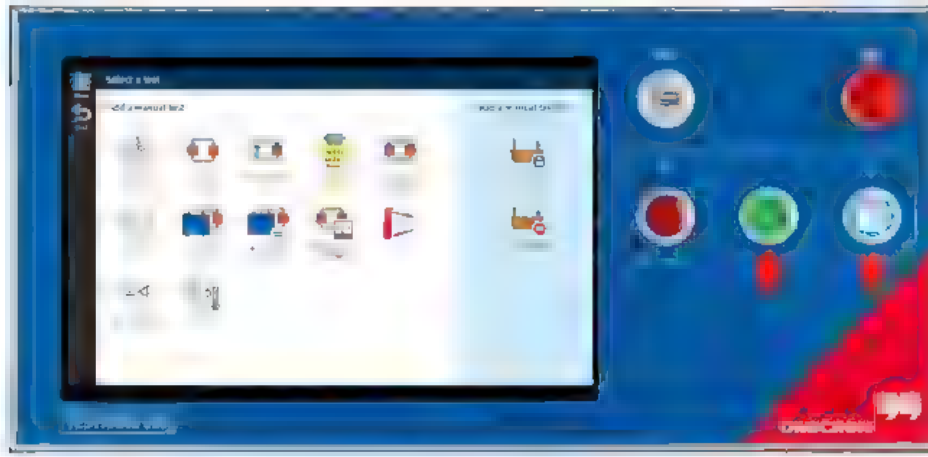
الشكل رقم (4-1-2)




الشكل رقم (4-1-3)

7. تهيئة منطقة الفحص عبر مراعاة الأمور التالية:
 - 7.1 التأكد من أن منطقة الفحص جافة قدر الإمكان.
 - 7.2 التأكد من عدم وجود مواد قابلة للإشتعال في منطقة الفحص.
 - 7.3 التأكد من التهوية الجيدة لمنطقة الفحص فيما إذا كانت مغلقة.
 - 7.4 التأكد من سلامة نظام التأريض في منطقة الفحص.
 - 7.5 وضع حواجز حول منطقة الفحص وشواخص تفيد بوجود فحص ذو فولتية وتيار خطير
8. إحضار جهاز الفحص (TESTRANO 600) إلى الموقع مع مراعاة وضع الجهاز بالظل وعدم تعريضه لأشعة الشمس المباشرة لوقت طويل، حيث أن الحرارة التشغيلية للجهاز يجب ألا تزيد عن (55°) درجة مئوية، وفي حال كانت الحرارة أكثر من (40°) درجة مئوية يجب الرجوع للكتيب التفصيلي (Manual) الخاص بجهاز الفحص لمعرفة التيار الأقصى الذي يُمكن حقنه من خلال الحمار، وكذلك مراعاة جفاف أجزاء الجهاز جميعها قبل تشغيله.
9. التأكد من أن مفتاح التشغيل الخاص بجهاز الفحص رقم (3) في الشكل (4-1-2) على وضعية (OFF - 0) الموضحة على المفتاح.
10. التأكد من ضغط زر إيقاف الفحص في حالات الطوارئ (Emergency Push Button) رقم (15) في الشكل (4-1-3).
11. وصل جهاز الفحص بالأرض (Local station earth) عبر منفذ التأريض رقم (1) في الشكل (4-1-2) بواسطة الكيبل المورّد مع الجهاز من قِبل الشركة المصنّعة أو بواسطة كيبل تأريض لا يقل مساحة مقطعه العرضي عن (6 mm²) ملي متر مربع أقرب ما يُمكن على مُشغل الجهاز لتقليل معاوقة التأريض (Impedance) قدر المستطاع.
12. التأكد من أن حزام المحول موصول بالأرض (Local station earth) عبر مسار تأريض ذو معاوقة قليلة (Low Impedance).

13. التأكد من أن كيبيل الأرضي لمصدر الطاقة الكهربائي الحاص بجهاز الفحص موصول بالأرض (Local station earth) بمُعاوقة قليلة (Low Impedance).
14. توصيل جهاز الفحص بمصدر الطاقة الكهربائية عبر المنفذ رقم (2) في الشكل (4-1-2) بحيث يتم وصل كيبيل الطاقة بجهاز الفحص أولاً ومن ثم بالمصدر الكهربائي.
15. تشغيل الجهاز بواسطة مفتاح التشغيل رقم (3) في الشكل (4-1-2) عن طريق تعير وضعيته من (0) إلى (I) الموضحة على المفتاح.
16. ملاحظة إنارة كل من لمبة الإشارة حضراء اللون رقم (18) والحلقة الرقواء حول زر بدء/إيقاف الفحص (Start/Stop) في الشكل (4-1-3)، وهذا يعني أن الجهاز لا يحقن تيار ولا فولتية كما يظهر في الشكل (4-1-4).



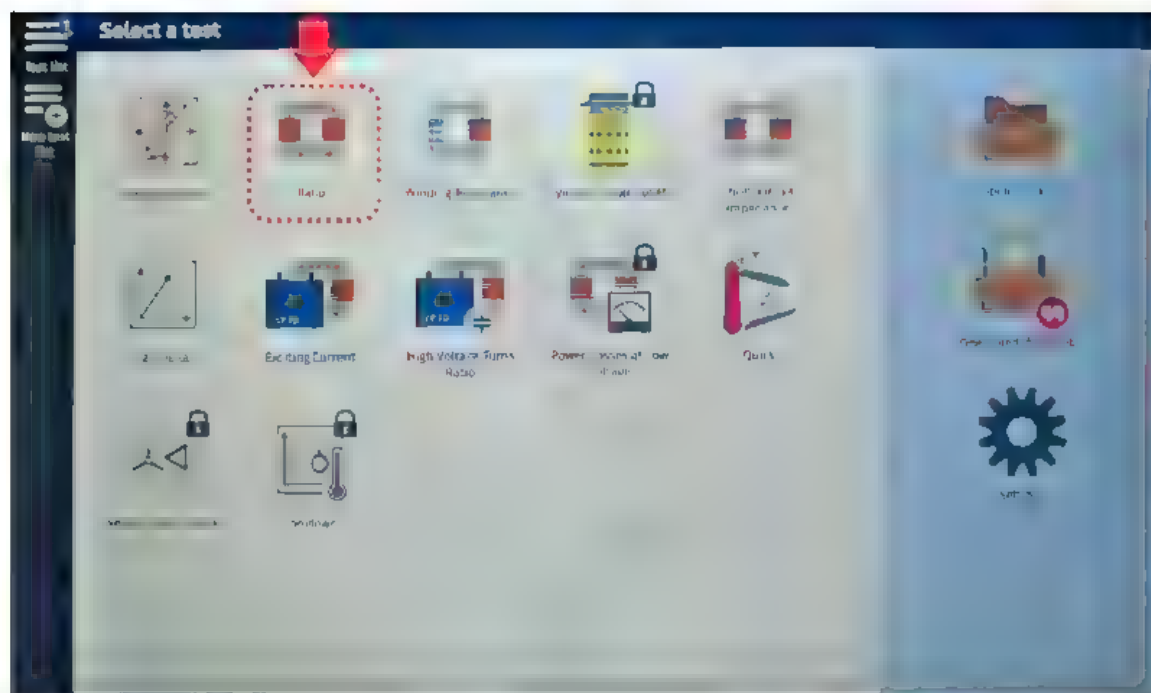
الشكل رقم (4-1-4)

17. في حال كان هبالك مشكلة ما في التأريض سوف تظهر رسالة على الشاشة تُفيد بذلك وستظهر العلامة التالية أسفل الشاشة ، وفي حال عدم إنارة أي ضوء تحديري أو ظهور أية رسائل تحذيرية على الشاشة فإن ذلك يعني أن الأرضي والجهاز سليمين والجهار مُهيأ لعمل باقي التوصيلات والبدء بالفحص.

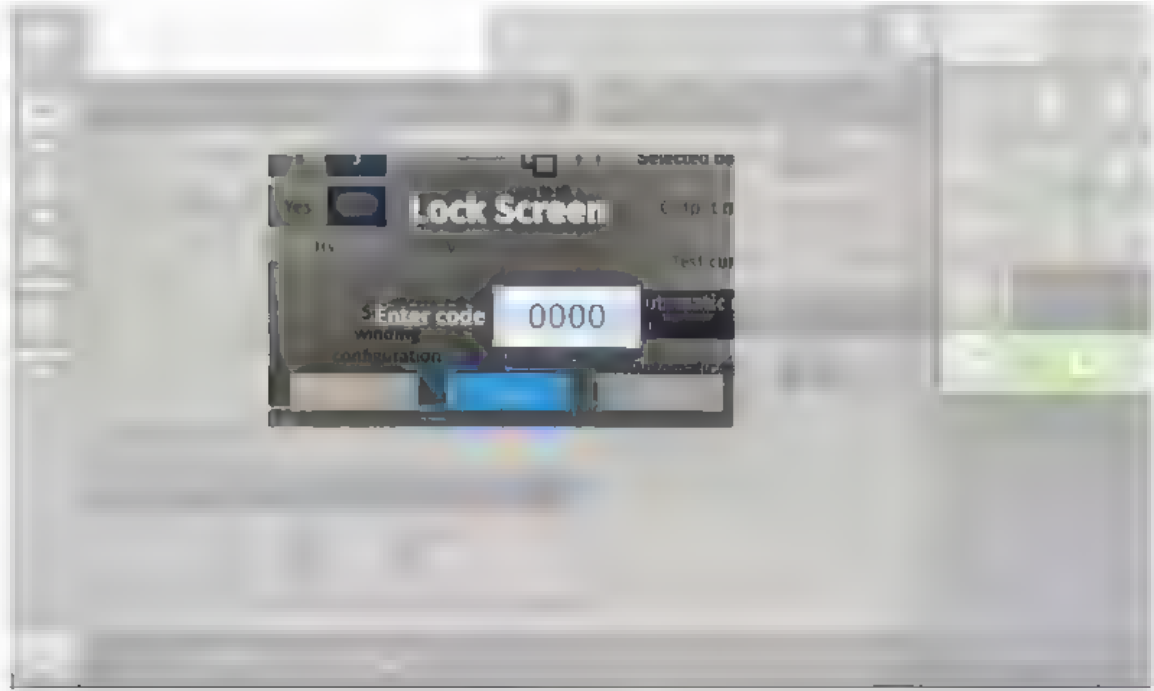
ملحوظة: يُتيح جهاز الفحص (TESTRANO 600) إمكانية ضبط إعدادات الفحص وإجراؤه بطريقتين، الطريقة الأولى بواسطة شاشة اللمس (Touch Control) مباشرة والطريقة الثانية بواسطة توصيل جهاز الحاسوب بجهاز الفحص (TESTRANO 600) والقيام بالفحص عبر برنامج (Primary Test Manger - PTM). حيث سيتم التطرق للطريقة الأولى فقط في هذا الملحق.



18. إختيار فحص نسبة اللفات/الفولتية (Ratio) من القائمة الرئيسية الظاهرة على شاشة اللمس (Touch Control) والمُبينة في الشكل (4-1-5).



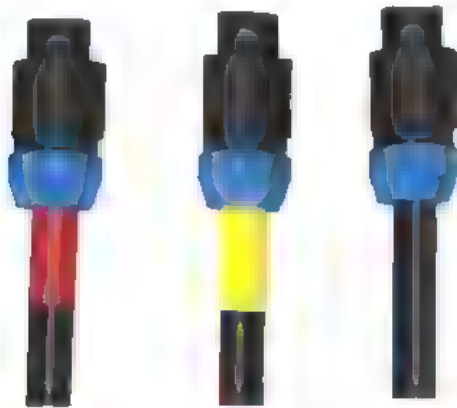
20. بعد الضغط على زر القفل (Lock) المبين في الشكل السابق تظهر النافذة الفرعية المُبينة في الشكل (4-1-7)، ثم نقوم بإدخال كود رياضي والضغط على كلمة (Lock). وبذلك نكون قد وصلنا للوضع الآمن للجهاز.



الشكل رقم (4-1-7)

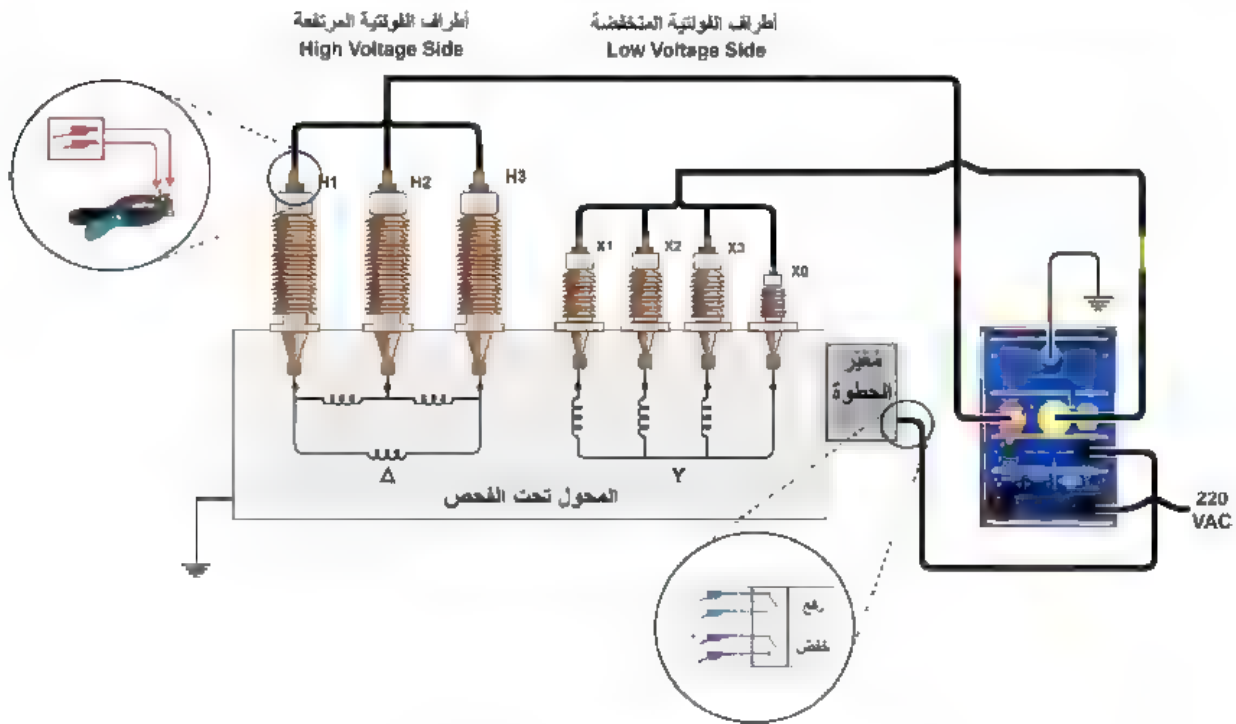
21. توصيل الكوابل الظاهرة في الشكل (4-1-8) بجهاز الفحص عبر المنافذ المبينة في الشكل (4-1-2) كالآتي:

- 21.1 توصيل كابل الفولتية المرتفعة (الأحمر) بالمنفذ رقم (4) المبين في الشكل (4-1-2).
- 21.2 توصيل كابل الفولتية المنخفضة (الأصفر) بالمنفذ رقم (9) المبين في الشكل (4-1-2).
- 21.3 توصيل كابل مُعَيَّر الخطوة (الأسود) بالمنفذ رقم (7) المبين في الشكل (4-1-2).



الشكل رقم (4-1-8)

22. توصيل كوابل جهار الفحص بالمحول وفقاً للتوصيلة المُبينة بالشكل (4-1-9).



الشكل رقم (4-1-9)

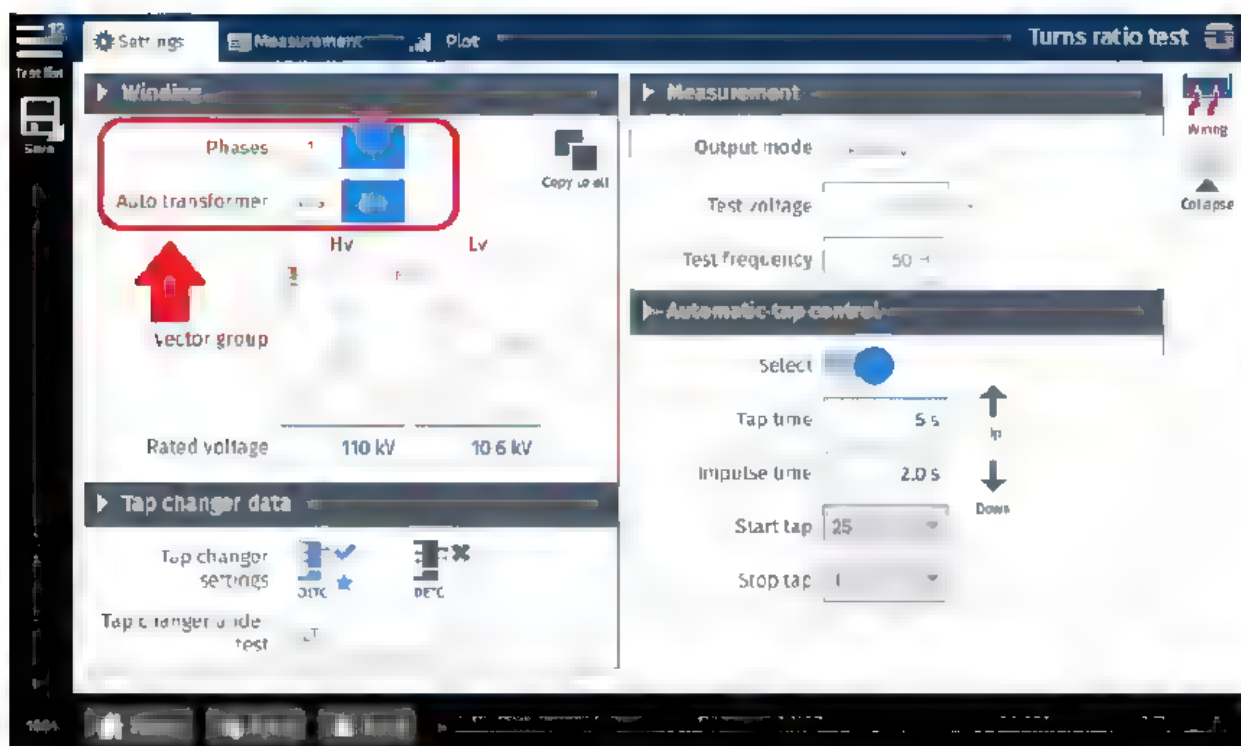
23. إرجاع الطاقة الكهربائية لمُغَيِّر الحِطْوَة (Tap-changer) فيما إذا كانت معصولة.

24. التأكد من نصب حواجز السلامة بالإضافة للشواخص التحذيرية.

25. بعد الإنتهاء من التوصيلة كاملة، نقوم بتحرير (Release) زر إيقاف الفحص في حالة الطوارئ (Emergency Stop Button).

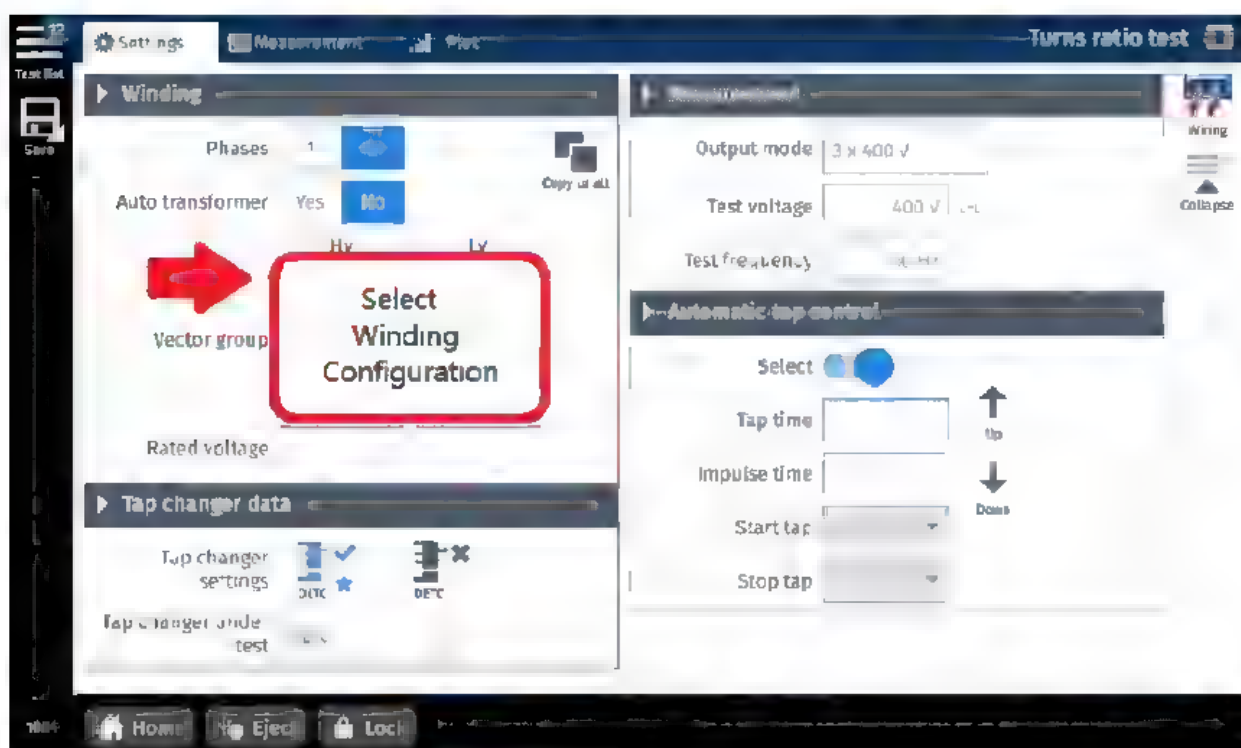
26. الرجوع لشاشة اللمس وإزالة قفل الشاشة عبر إدخال الكود الرباعي و الضغط على أيقونة الإدخال ويمكن كذلك إزالة قفل الشاشة عبر إطفاء الجهاز وتشغيله مره أخرى.

27. من الشاشة الظاهرة في الشكل (4-1-10) والتي تكون بالبداية على نافذة التبويب إعدادات (Settings) يتم تحديد عدد أطوار المحول المُراد فحصه بالضغط على الرقم (3) أي أنه ثلاثي الطور (3 phase transformer)، ثم يتم الضغط على (No) بجانب المحول التلقائي (Auto Transformer).



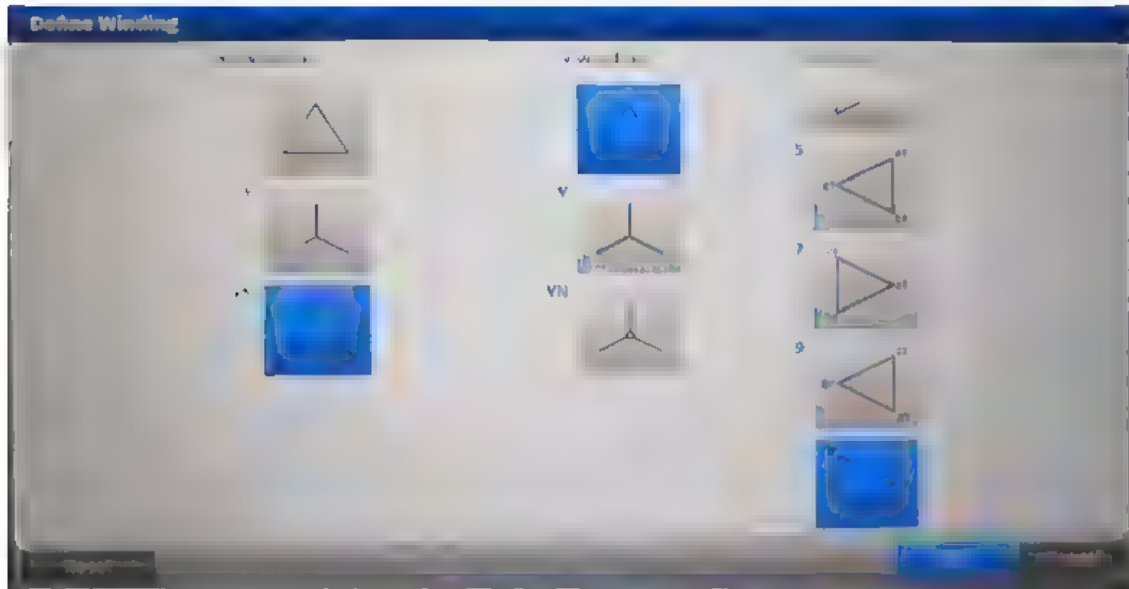
الشكل رقم (4-1-10)

28. نقوم بتحديد مجموعة التوصيل (Vector group) الخاصة بالمحول المُراد فحصه وذلك بالضغط على جملة إختار مجموعة التوصيل (Select winding configuration) الظاهرة على الشاشة والمُبيّنة في الشكل (4-1-11) لتظهر لنا شاشة تحديد مجموعة التوصيل.



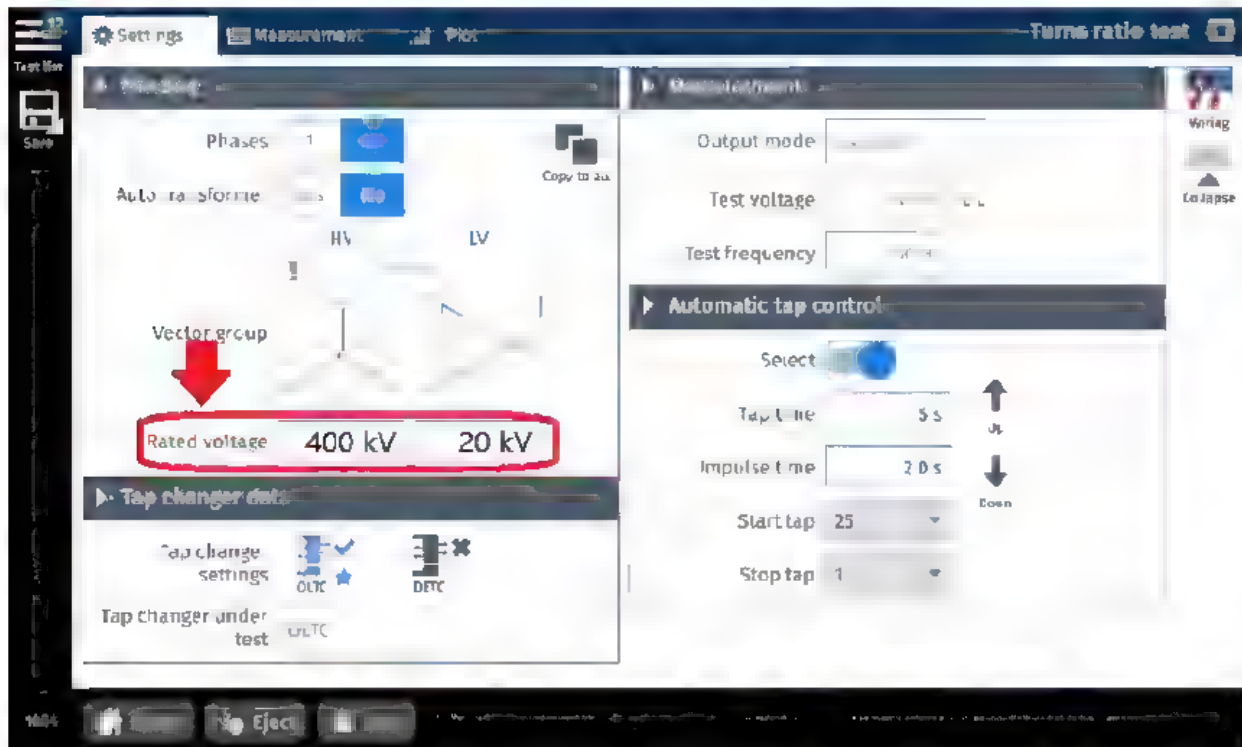
الشكل رقم (4-1-11)

29. من شاشة تحديد مجموعة التوصيل الظاهرة في الشكل (4-1-12) نقوم بتحديد مجموعة التوصيل الخاصة بالمحول المُراد فحصه، حيث تم تحديد المجموعة (YNd11) كمثال ثم الضغط على زر حفظ (Save).



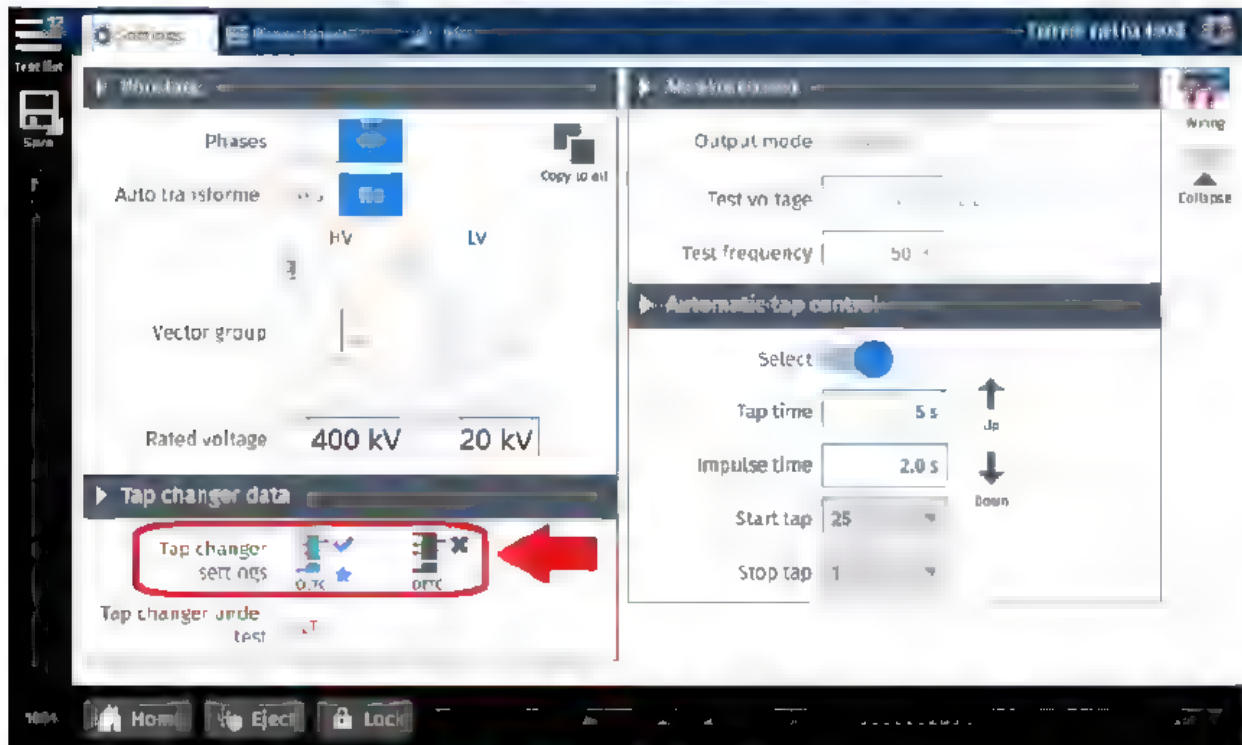
الشكل رقم (4-4-12)

30 تحديد الفولتية الإسمية للمحول المُراد فحصه وذلك بإدخال قيمة هذه الفولتية بالمكان المخصص لها كما هو مبين بالشكل (4-1-13).



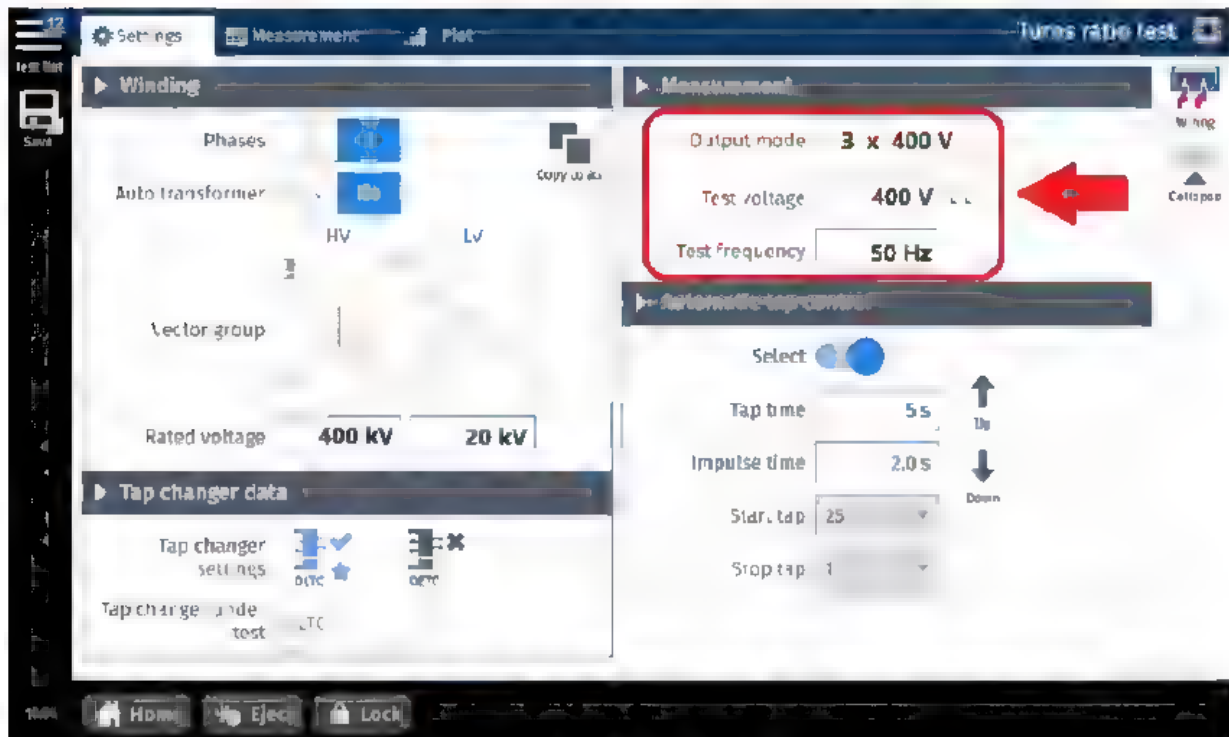
الشكل رقم (4-1-13)

31. تحديد نوع مُغيّر الخطوة (Tap Changer) فيما إذا كان (OLTC أو DETC)، وفي حالتنا هذه نقوم باختيار (OLTC) وذلك بالضغط عليها كما هو مُبين بالشكل (4-1-14).



الشكل رقم (4-1-14)

32. تحديد نمط فولتية المخرج (Output mode) بالضغط على (3 phases) وذلك لتفعيل الفحص بالنمط ثلاثي الطور، وكذلك تحديد فولتية وتردد الفحص كما هو مُبين في الشكل (4-1-15).



الشكل رقم (4-1-15)

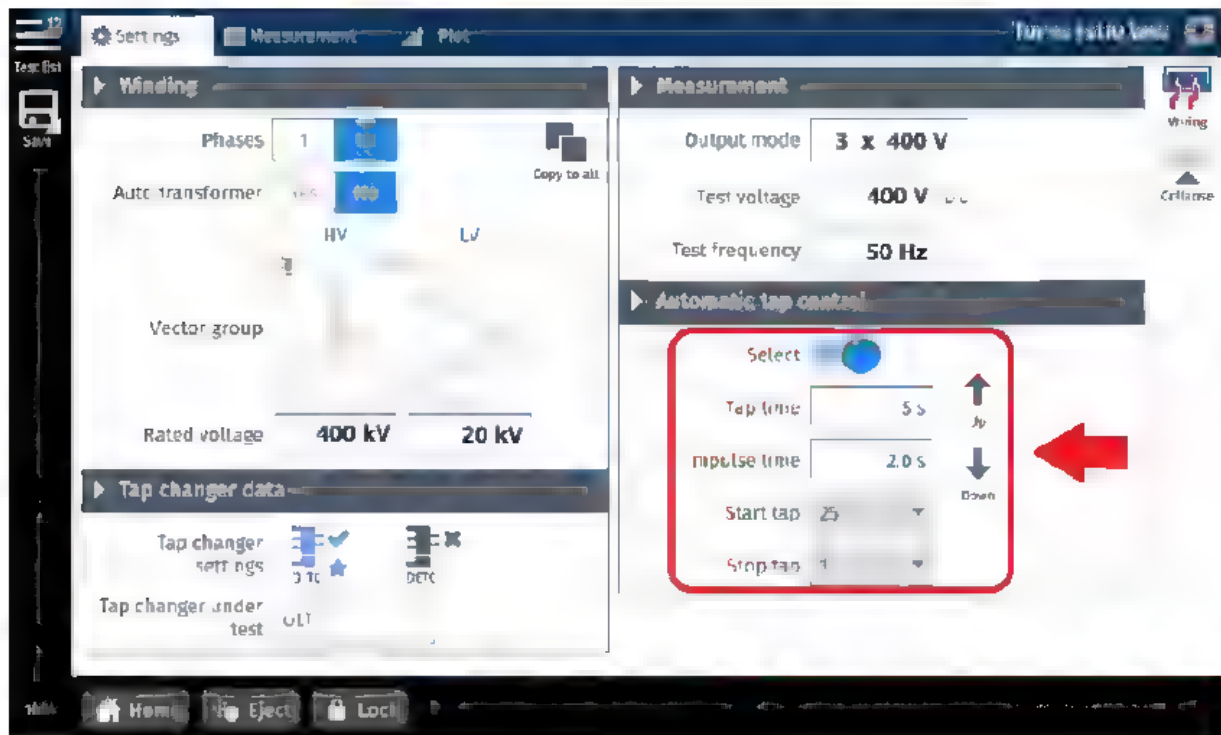
33. ضبط إعدادات مُغيّر الخطوة (Tap Changer) في حال تم إختيار (OLTC) كما هو مُبين في الشكل (4-1-16) ووفقاً للخطوات التالية:

33.1 تحديد وضع التعير بين الخطوات (Taps) يدوي (Manual) أو تلقائي (Automatic)

33.2 تحديد زمن التغير بين الخطوات (Tap time).

33.3 تحديد مدة إشارة التغير بين الخطوات (Impulse time).

33.4 تحديد خطوة البداية (Start Tap) وخطوة النهاية (Stop Tap).



الشكل رقم (4-1-16)

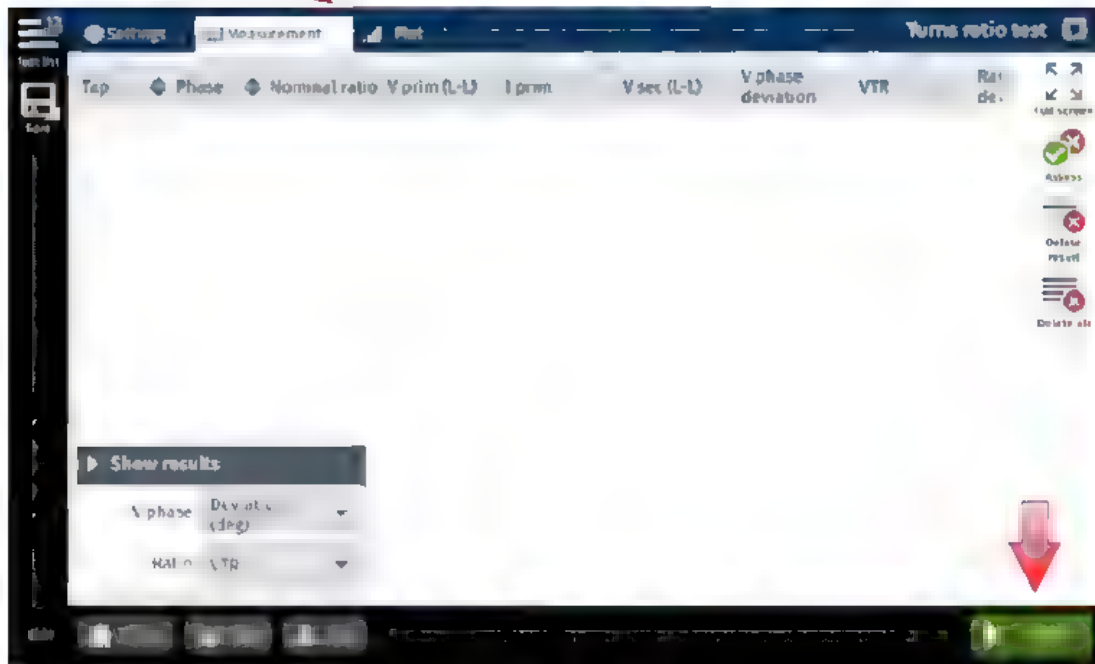
34 بالرجوع إلى لوحة التحكم باللمس (Touch Control) والضغط على علامة التبويب قياسات

(Measurements) المحاذية لنافذة التبويب إعدادات (Settings) لتظهر الشاشة المُبينة بالشكل

(4-1-17) ثم نقوم بالضغط على زر إبدء (Start) ثم التأكد من إنارة الحلقة الزرقاء حول زر

(Start/Stop) الظاهر في الشكل (4-1-4) وبذلك يكون الجهاز بوضعية الإستعداد للحقن.

نافذة التبويب - قياسات



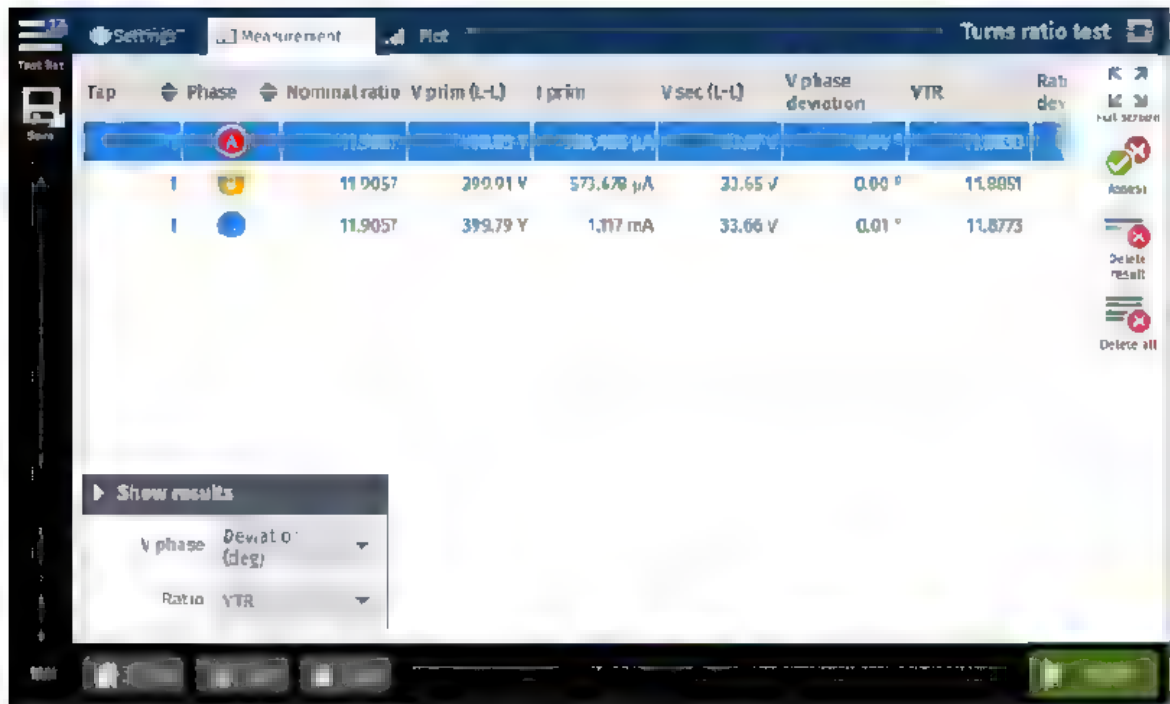
الشكل رقم (4-1-17)

35. الضغط على زر إبدء/توقف (Start/Stop)  الطاهر في الشكل (4-1-4) ليبدأ الفحص ويتم الحقن الفعلي للتيار ويبدأ الضوء الأحمر  والحلقة الزرقاء حول زر (Start/Stop)  بالوميض بشكل متقطع لمدة ثلاث ثواني تقريباً.

تحذير: لا تُقْم بإزالة أسلاك الفحص إلا بعد التأكد من أن لمبة الإشارة التحذيرية الحمراء على الواجهة الأمامية (الرئيسية) لجهاز الفحص مُطفئة (OFF) ولمبات الإشارة التحذيرية على الواجهة الخلفية لجهاز الفحص مُطفئة (OFF) وكذلك لمبة الإشارة الخضراء على الواجهة الأمامية (الرئيسية) لجهاز الفحص مضيئة (ON).



36 بعد الإنتهاء من الفحص يومض الضوء الأخضر  وبعدها يمكن إيجاد النتائج في علامة التبويب قياسات (Measurements) كما هو مُبين بالشكل (4-1-18) وبذلك يكون قد إنتهى الفحص.



الشكل رقم (3-1-20)

الملحق (2-4)

تنويه

يضم هذا الملحق خطوات الفحص وتوصيلاته بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسّط. إستناداً على الخبرة بالتعامل مع هذه الأجهزة، وتُجدر الإشارة أنه في حال إستخدام جهاز الفحص المُشار إليه في هذا الملحق لا يجب الإعتماد على هذا الملحق فقط، بل يجب قراءة الكُتبيات التفصيلية الخاصة بهذا الجهاز والمزودة بواسطة الشركة المُصنعة للجهاز جيداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية و السلامة العامة

فحص نسبة عدد لفات المحول بإستخدام جهاز TTRU3 by MEGGER



الشكل رقم (1-2-4)

• مواصفات الجهاز: حسب ال(TTRU3 User Manual)

- فولتية المدخل الاسمية : 220V, 50Hz
- فولتية المدخل المسموح بها : 90-264V, 47-63Hz, 250VA max
- نطاق تيار/فولتية المخرج : حسب الجدول التالي.

3Ph 1 - 48V, up to 250 on primary	الفولتية (AC)
0.1mA - 1A, MAX 1A @ 48V	التيار
50 -480Hz	التردد

- أساليب الفحص : حسب الجدول التالي.

3Ph Step-up
3Ph Step-down
1Ph Step-up
1Ph Step-down

- دقة النتيجة المُقاسة : حسب الجدول التالي عند درجة الحرارة (-20°C - 50°C).

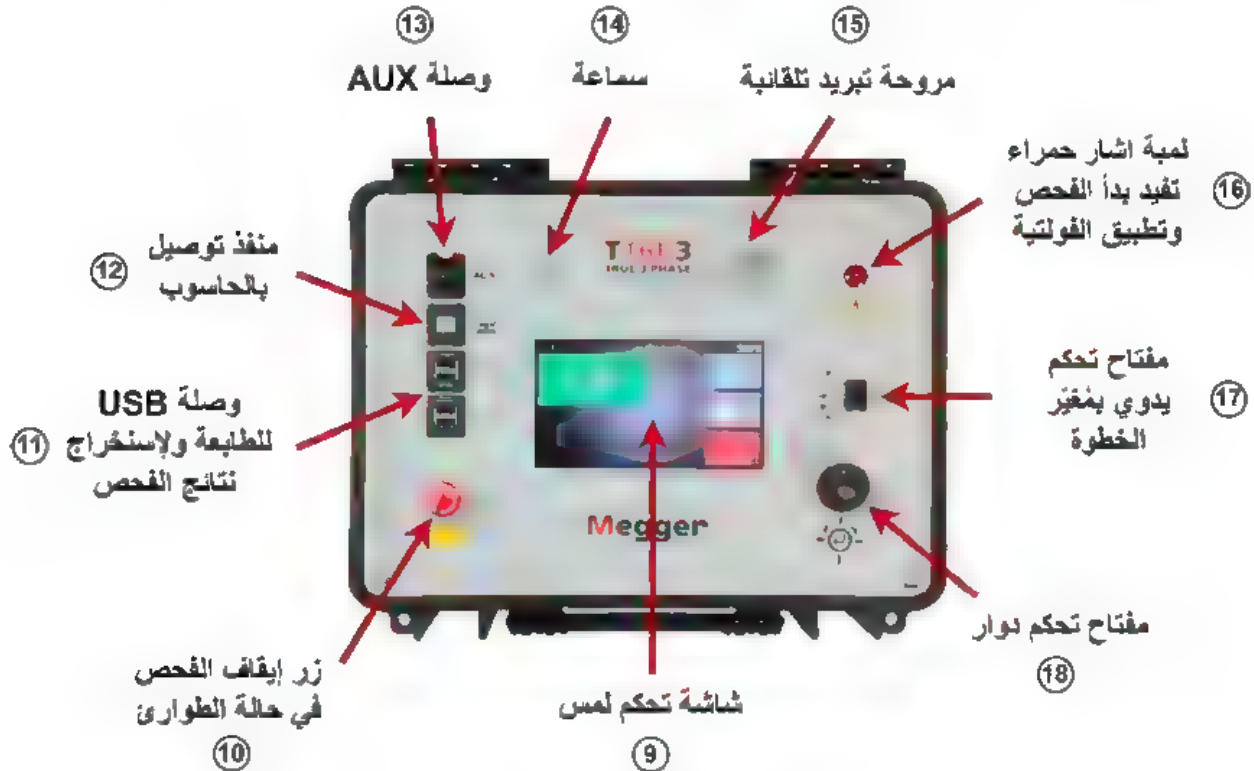
أسلوب الفحص	دقة القراءات
تنازلي Step-down (25-48V)	$\pm 0.05\%$ 0.8 - 1000 $\pm 0.10\%$ 1001 - 2000 $\pm 0.30\%$ 2001 - 15000 $\pm 1\%$ 15001 - 50000
تنازلي Step-down (1-24V)	$\pm 0.10\%$ 0.8 - 1000 $\pm 0.20\%$ 1001 - 2000 $\pm 0.60\%$ 2001 - 15000
تصاعدي Step-up (25-250V)	$\pm 0.05\%$ 0.8 - 200
تصاعدي Step-up (1-24V)	$\pm 0.10\%$ 0.8 - 200

- البيئة التشغيلية المحيطة : -4°F to 122°F (-20°C to 50°C) RH to 90%, Non condensing
- البيئة التخزينية المحيطة : -22 to 158°F (-30 to $+70^{\circ}\text{C}$) :
- أبعاد الجهاز : 406 x 304 x 254 mm :
- وزن الجهاز : 14 lb. (6.5 kg) :

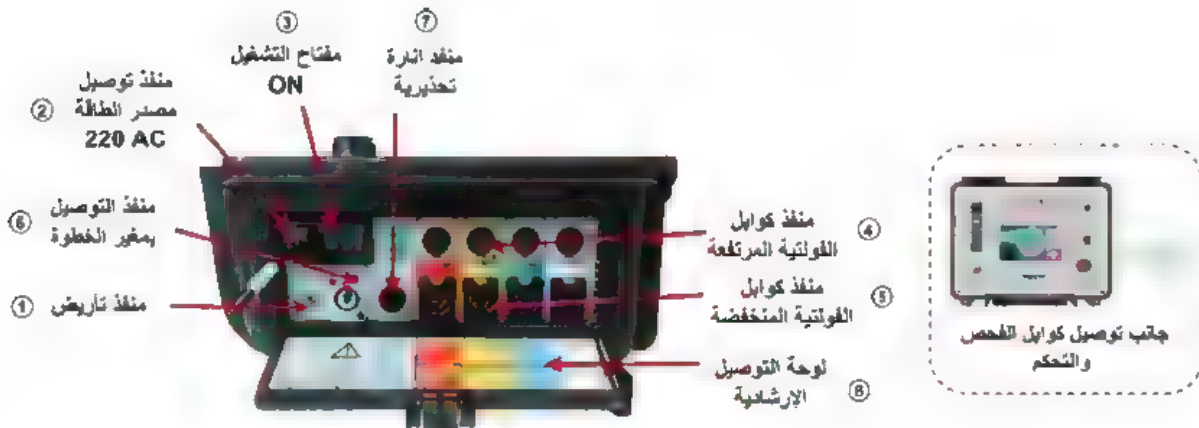
• خطوات الفحص بواسطة هذا الجهاز:

1. التأكد من تطبيق الخطوات (5.1 إلى 5.5) الواردة في فقرة خطوات الفحص من فصل فحص نسبة عدد الملفات.
2. التأكد من أن الدائرة المراد فحصها غير مُكهربة وعدم وجود احتمالية لكهربتها أثناء الفحص.
3. تجنب لمس دائرة الفحص أثناء إجراء الفحص أو بعده، إلا بعد التأكد من عدم وجود فولتية وأن الملفات تم تفريغها من الشحنات المخزنة تماماً.

4. التأكد من أن أسلاك التوصيل الخاصة بجهاز الفحص (Test leads) وكذلك المشابك الخاصة بها (Clamps) في حالة جيدة وغير متسحة ولا تعاني من أية أضرار فيزيائية كالشقوق أو الكسور.
5. التأكد من أن جهاز الفحص المراد استخدامه مُعاير (Calibrated)، مع مراعاة عدم استخدام الجهاز في الأجواء القابلة للإنفجار.
6. قبل البدء بالفحص يُفضّل التعرف على أجزاء جهاز الفحص من شاشة ومنافذ وأزرار ومفاتيح تحكم ولمبات إشارة كما هو مُبين بالأشكال (4-2-2&3).



الشكل رقم (4-2-2)



الشكل رقم (4-2-3)

7. تهيئة منطقة الفحص عبر مراعاة الأمور التالية:
 - 7.1 التأكد من أن منطقة الفحص جافة قدر الإمكان.
 - 7.2 التأكد من عدم وجود مواد قابلة للإشتعال في منطقة الفحص.

- 7.3 التأكد من التهوية الجيدة لمنطقة الفحص فيما إذا كانت مغلقة.
- 7.4 مراعاة أن يكون سطح الفحص مستوي قدر الإمكان.
- 7.5 التأكد من سلامة نظام التأريض في منطقة الفحص.
- 7.6 وضع حواجز حول منطقة الفحص وشواخص تفيد بوجود فحص ذو فولتية وتيار خطير
8. إحضار جهاز الفحص (TTRU3) إلى الموقع مع مراعاة وضع الجهاز بالظل وعدم تعريضه لأشعة الشمس المباشرة لوقت طويل، حيث أن الحرارة التشغيلية للجهاز يجب ألا تزيد عن (50°) درجة مئوية، وكذلك مراعاة جفاف أجزاء الجهاز جميعها قبل تشغيله.
- 9 التأكد من أن مفتاح التشغيل الخاص بجهاز الفحص رقم (3) في الشكل (3-2-4) على وصعية (OFF - 0) الموضحة على المفتاح.
10. التأكد من ضغط زر إيقاف الفحص في حالات الطوارئ (Emergency Push Button) رقم (10) في الشكل (2-2-4).
11. وصل جهاز الفحص بالأرض (Local station earth) عبر منفذ التأريض رقم (1) في الشكل (2-4-3) بواسطة الكيبل المورّد مع الجهاز من قِبل الشركة المصنّعة أو بواسطة كيبل تأريض ذو مساحة مقطع مناسب أقرب ما يُمكن على مُشغل الجهاز لتقليل معاوقة التأريض (Impedance) قدر المستطاع، مع مراعاة أن يكون كيبل التأريض أول كيبل يتم وصله وآخر كيبل يتم إزالته عن الجهاز بعد الفحص.
12. التأكد من أن خزان المحول موصول بالأرض (Local station earth) عبر مسار تأريض ذو معاوقة قليلة (Low Impedance).
13. التأكد من أن كيبل الأرضي لمصدر الطاقة الكهربائي الخاص بجهاز الفحص موصول بالأرض (Local station earth) بمعاوقة قليلة (Low Impedance).
14. توصيل جهاز الفحص بمصدر الطاقة الكهربائية عبر المنفذ رقم (2) في الشكل (3-2-4) بحيث يتم وصل كيبل الطاقة بجهاز الفحص أولاً ومن ثم بالمصدر الكهربائي.
15. توصيل الكوابل الظاهرة في الشكل (4-2-4) بجهاز الفحص عبر المنافذ المبينة في الشكل (3-2-4) كالآتي:
 - 15.1 توصيل كيبل الفولتية المرتفعة (الأحمر) بالمنفذ رقم (4) المُبين في الشكل (3-2-4).
 - 15.2 توصيل كيبل الفولتية المنخفضة (الأسود) بالمنفذ رقم (5) المُبين في الشكل (3-2-4).
 - 15.3 توصيل كيبل التحكم بمُغيّر الخطوة بالمنفذ رقم (6) المُبين في الشكل (3-2-4).

كوابل فحص ملفات الفولتية المرتفعة



كوابل فحص ملفات الفولتية المنخفضة



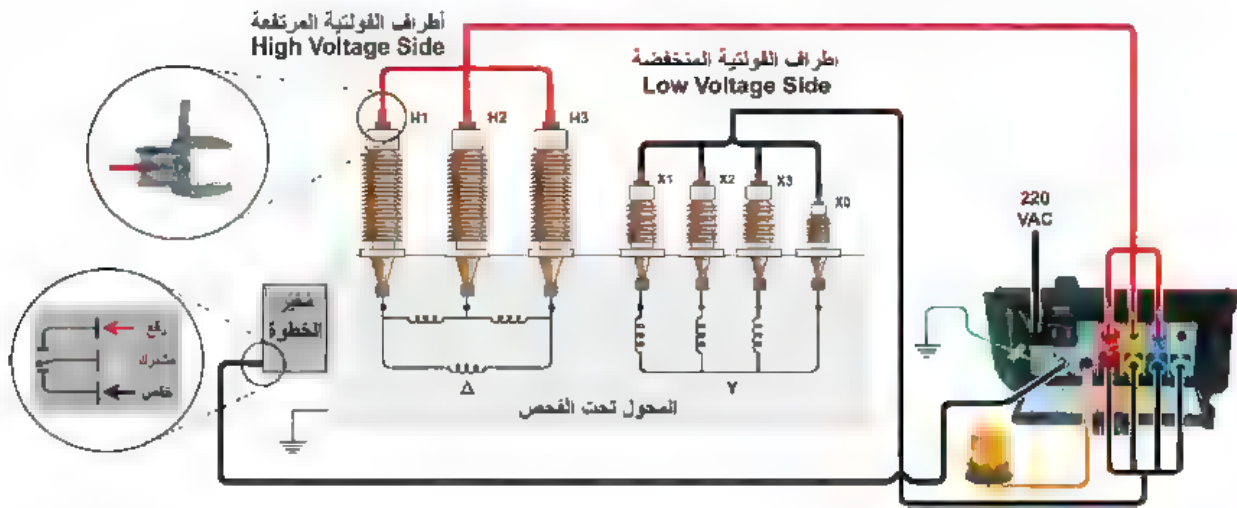
كوابل الإشارة التحذيرية Beacon



كوابل التحكم بـمُغَيِّر الخطوة

الشكل رقم (4-2-4)

16. توصيل كوابل جهاز الفحص بالمحول وفقاً للتوصيلة المُبينة بالشكل (4-2-5).

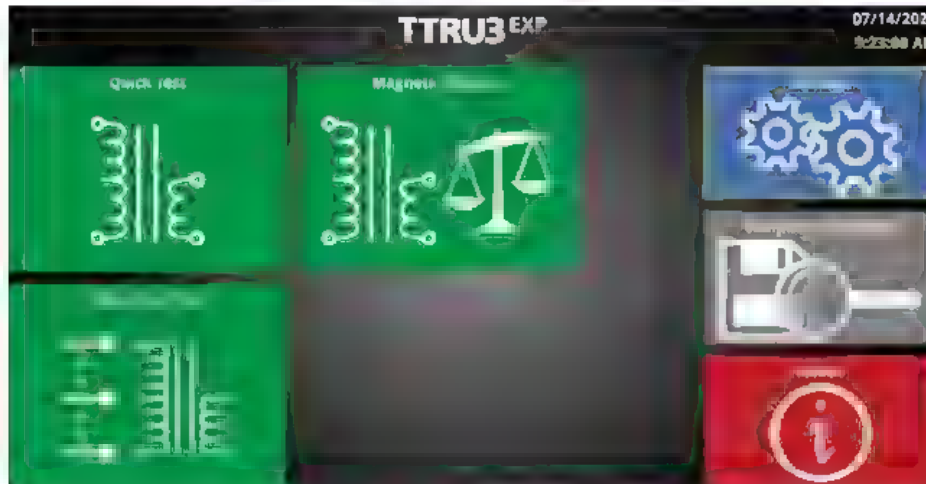


الشكل رقم (4-2-5)

تحذير: يجب التأكد من أن المشابك (Clamps) الخاصة بكوابل الفحص غير المستخدمة في توصيلة الفحص غير متصلة ساقى المشابك (Clamps) أو الأرضي أو الأشخاص.

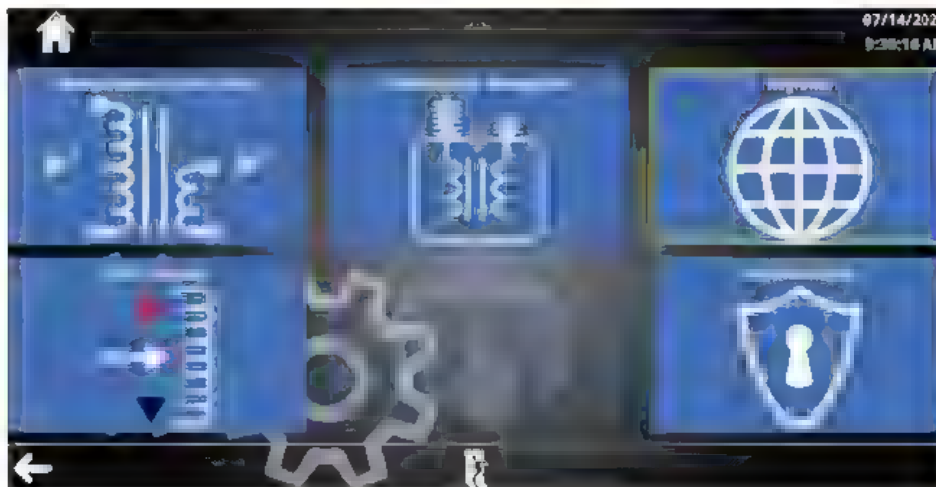


17. تشغيل الحهاز بواسطة مفتاح التشغيل رقم (3) في الشكل (4-2-3) عن طريق تغيير وضعيته من (0) إلى (I) الموضحة على المفتاح، وملاحظة إنارة لمبة الإشارة خضراء اللون.
18. بالمداية لا بُد من ضبط الإعدادات وذلك بالضغط على كلمة (Settings) من الشاشة الرئيسية المُبينة في الشكل (4-2-6).



الشكل رقم (4-2-6)

19. بعد ذلك تظهر الشاشة المُبينة في الشكل (4-2-7)، والتي تتيح لنا ضبط القياسات والحدود المسموح بها (Measurements and limits) بالإضافة لآلية التحكم بمتغير الخطوة (OLTC Control) وكذلك تتيح لنا إدخال بيانات المحول المراد فحصه (Transformer Nameplate).



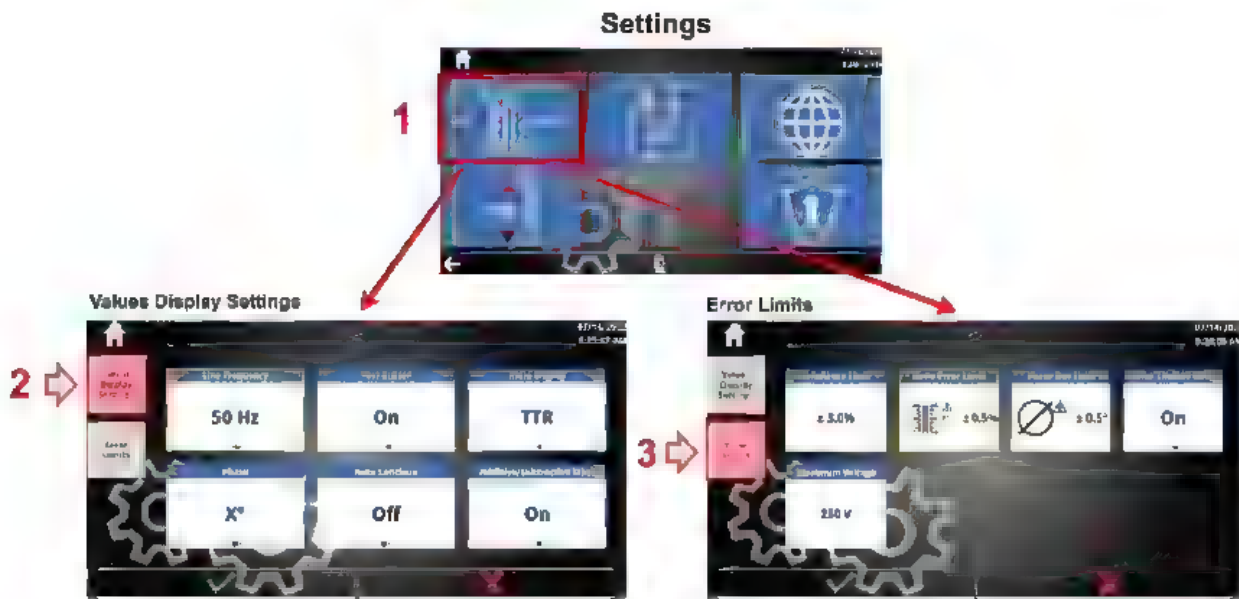
الشكل رقم (4-2-7)

20. ولضبط إعدادات القياسات نقوم بالضغط على (Measurements and limits) لتظهر لنا شاشة ذات علامتي تبويب (Values display settings) و (Error Limits) كما هو مُبين في الشكل (4-2-8) ومنهما يمكن ضبط الآتي:
- 20.1 تردد الفحص: يتم ضبط التردد على (50Hz) هيرتز.

20.2 النسبة المعروضة: يتيح هذا الخيار التحكم بنوع النسبة المُستخرجة من الفحص فيما إذا كانت (TTR) أو (TNR)، علماً بأنه يُمكن التحكم بها بعد إستخراج تقرير الفحص في حال لم يتم ضبطها مسبقاً من خلال هذا الخيار.

20.3 نسبة الخطأ المسموح بها: يتيح هذا الخيار ضبط نسبة الخطأ المسموح بها فيما يُخص فحص نسبة عدد اللغات، وكما ذكر سابقاً وبالرجوع للمعايير العالمية يجب ضبط هذا الخيار على (0.5%) بالمئة.

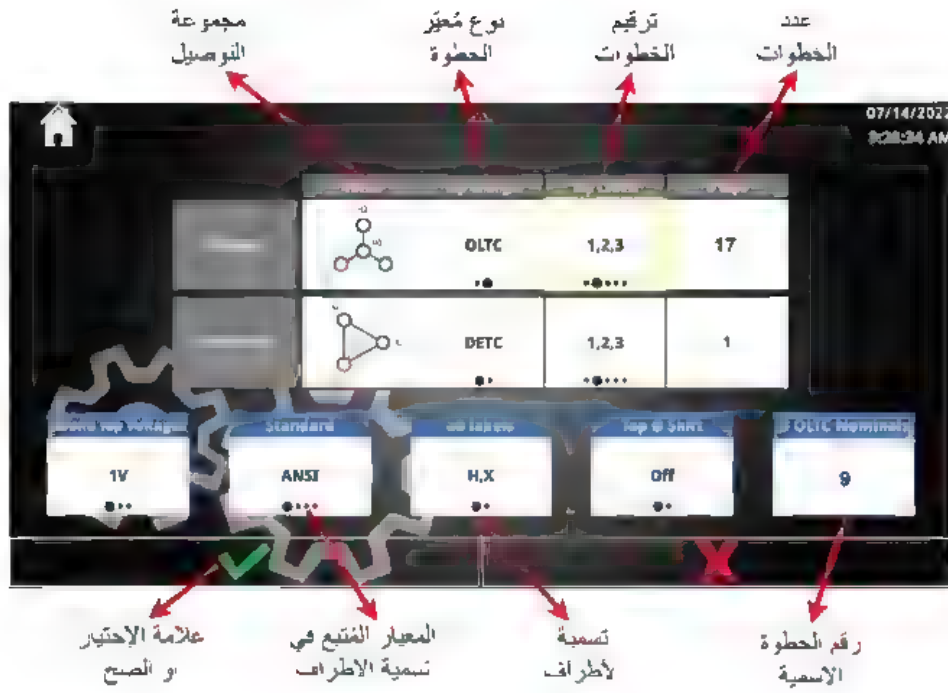
هذه أهم الخيارات التي يتم ضبطها علماً بأنه يوجد خيارات أخرى تُخص هذه الفحص ومنها ما يُخص فحوصات أخرى يتيح عملها هذا الجهاز كفحص تيار التهبيج (Excitation Current Test) بالإضافة إلى إستخراج قيمة الـ (Phase Deviation).



الشكل رقم (4-2-8)

بعد الإنتهاء من ضبط القيم السابقة يتم الضغط على علامة الإختيار (الصح) خضراء اللون للحفظ والرجوع لشاشة الإعدادات المبيّنة في الشكل (4-2-7).

21. ولضبط بيانات المحول نقوم بإختيار (Transformer Nameplate) من شاشة الإعدادات المُبيّنة في الشكل (4-2-7) لتظهر لنا الشاشة المُبيّنة في الشكل (4-2-9) ثم نقوم بتحديد مجموعة التوصيل (Vector Group) للمحول المُراد فحصه بالإضافة لنوع مُغيّر الخطوة (Tap changer) وعدد الخطوات (# Taps) وكذلك تحديد الخطوة المرجعية أو الإسمية (Nominal Tap) ومن ثم نقوم بالضغط على علامة الإختيار (الصح) خضراء اللون للحفظ والرجوع لشاشة الإعدادات.



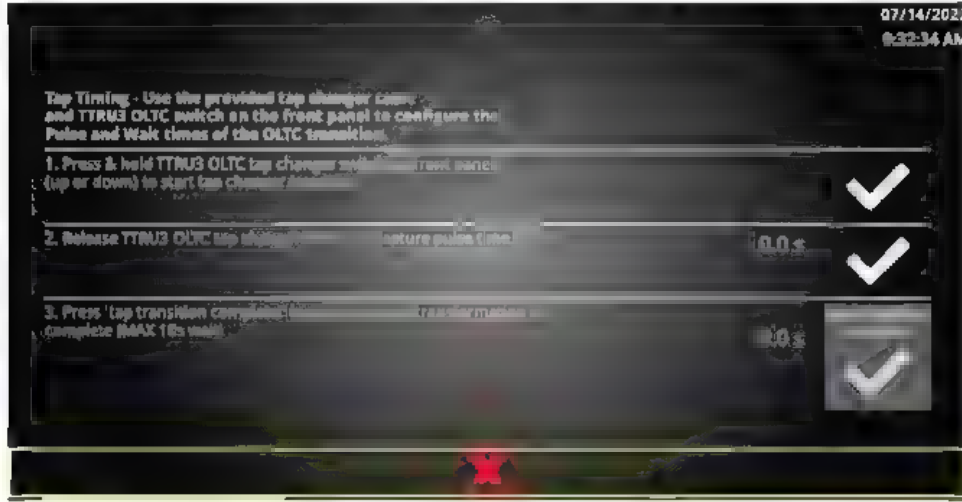
الشكل رقم (4-2-9)

22. ولضبط آلية التحكم بمُعَيَّر الخطوة (OLTC) نقوم بالضغط على خيار (OLTC Control) من شاشة الإعدادات (Settings) المُبينة في الشكل (4-2-7) السابق للإنتقال للشاشة الظاهرة في الشكل (4-2-10) ومنها يتم إختيار طريقة التحكم بمُعَيَّر الخطوة (OLTC) فيما إذا كان يدوي (Manual) أو تلقائي (Automatic)، وفي حال إختيار الوضع التلقائي (Automatic) يجب تحديد زمن أمر تغيير الوضعية (Pulse) وزمن الإنتقال من خطوة لأخرى (Wait) بالثواني.



الشكل رقم (4-2-10)


في حال كنت تعلم زمن التبديل و زمن أمر التبديل يُمكنك إدخاله مباشرة بالضغط على (Pulse) لتحديد زمن أمر التبديل أو بالضغط على (Wait) لإدخال زمن التبديل أما في حال لم تكن تعلم الأزمنة سابقة الذكر يُمكنك الضغط على مقياس الزمن (Tap Timing) كما هو مبين في الشكل (4-2-11).



الشكل رقم (4-2-11)

فبالرجوع للشاشة المبينة في الشكل (4-2-11) السابق ولقياس زمن أمر التبديل (Pulse) نقوم بتغيير وضعية مُغيّر الخطوة (OLTC) وذلك بواسطة المفتاح رقم (17) المبين في الشكل (4.2.2) صعوداً أو نزولاً بالضغط المطول لحين بدأ حركة مُغيّر الخطوة وبعدها نوقف الضغط وبذلك يقوم الجهاز بإحتساب زمن أمر التبديل (Pulse)، و عند إنتهاء الحركة وانتقال مُغيّر الخطوة من خطوة لآخرى نقوم بالضغط على (tap transition complete!) وذلك لإحتساب زمن التبديل (Wait)

كما ويُمكن أيضاً الضغط على (Regional) من شاشة الإعدادات في الشكل (4-2-7) السابق لضبط التاريخ والوقت الخاص بالجهاز بالإضافة لتغيير لغة الجهاز.

وبعد الإنتهاء من ضبط الإعدادات الرئيسية للجهاز نقوم بالرجوع للشاشة الرئيسية المبينة بالشكل (4-6) وذلك بالضغط على علامة المنزل أعلى شاشة الإعدادات يميناً  ويُمكننا البدء بإعداد خطة فحص جديدة (New Test Plan).

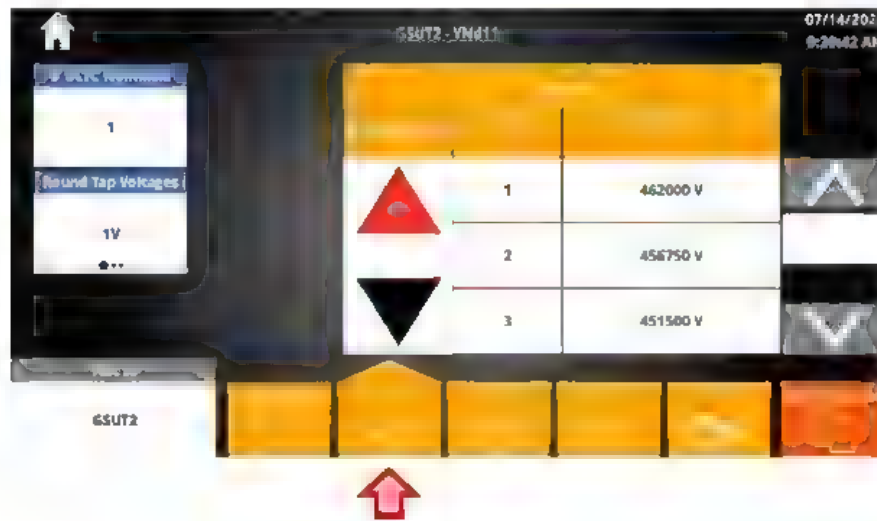
23. لبدأ إعدادات الفحص نقوم بالضغط على خطة فحص جديدة (New test plan) من الشاشة الرئيسية المُبينة بالشكل (4-2-6) لتظهر لنا الشاشة في الشكل (4-2-12) على علامة التبويب (Nameplate) والتي من خلالها نقوم بتحديد الآتي:

- 23.1 تحديد مجموعة التوصيل (Connection Group) للمحول المُراد فحصه
- 23.2 تحديد نوع مُغيّر الخطوة (TC) لملفي المحول.
- 23.3 تحديد عدد خطوات مُغيّر الخطوة (TC).
- 23.4 تحديد الخطوة المرجعية لمُغيّر الخطوة (TC).
- 23.5 تحديد فولتية الملفات الإسمية بالإضافة لفولتية أول وآخر خطوة.



الشكل رقم (4-2-12)

24. الانتقال لعلامة التبويب (Taps) والتي من خلالها يتم التأكد من فولتية جميع خطوات مُغيّر الخطوة (TC) لكلا الملفين للمحول كما هو موضح في الشكل (4-2-13).



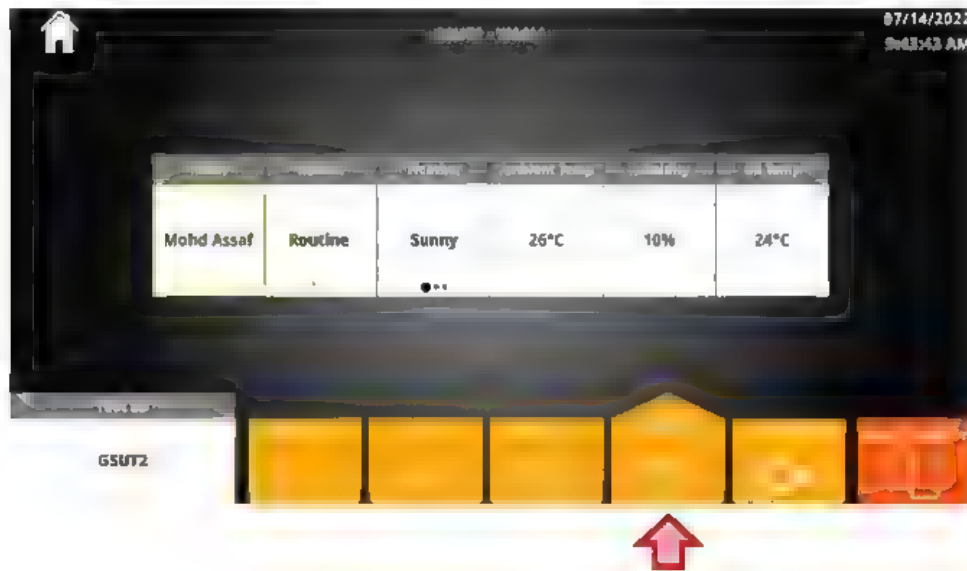
الشكل رقم (4-2-13)

25. الانتقال لعلامة التبويب (Asset Info) والتي من خلالها يتم إدخال معلومات المحول كما هو موضح في الشكل (4-2-14).



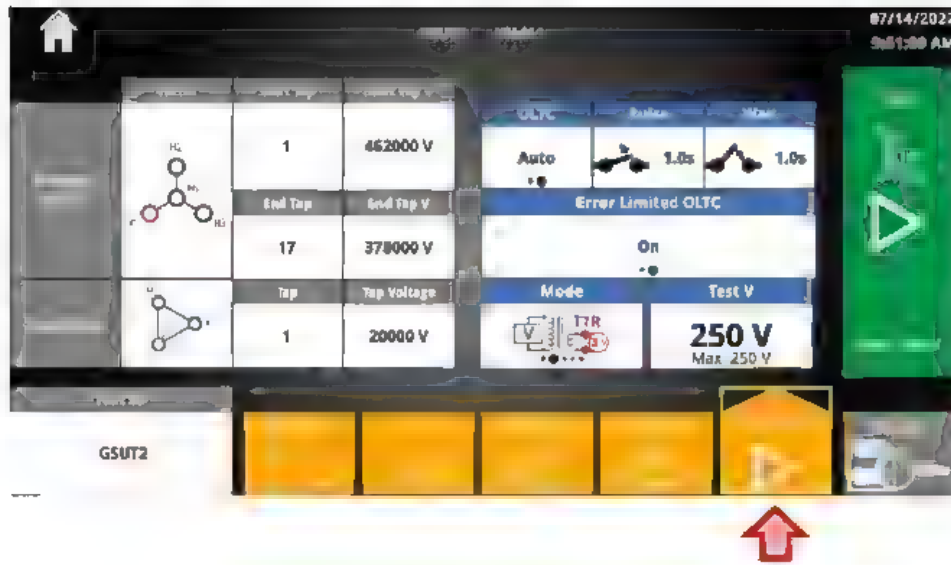
الشكل رقم (4-2-14)

26. الانتقال لعلامة التبويب (Conditions) والتي من خلالها يتم إدخال إسم الشخص الذي يقوم بالفحص و سبب الفحص فيما إذا كان فحص قبول أو روتيني أو غيره من الأسباب بالإضافة للطقس و درجة حرارة الجو المحيط والرطوبة وكذلك درجة حرارة زيت المحول كما هو موضح في الشكل (4-2-15).



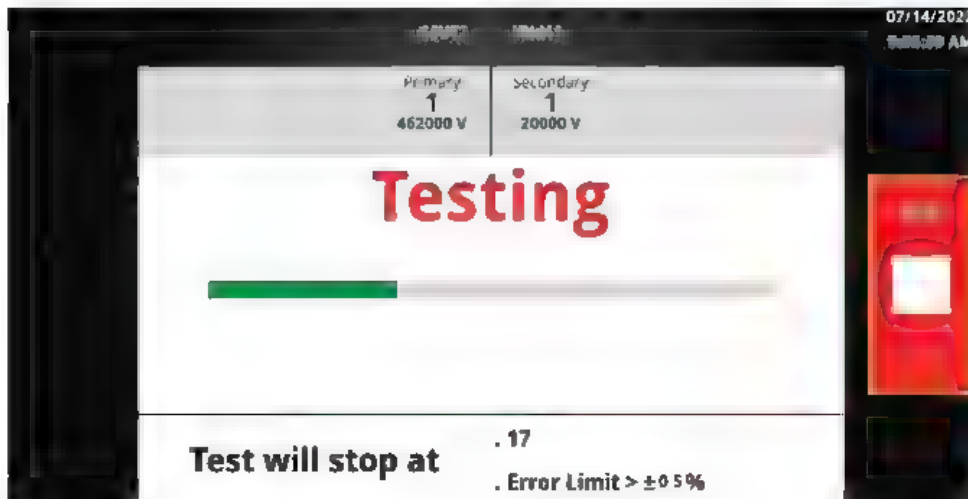
الشكل رقم (4-2-15)

27. ننتقل لعلامة التبويب (Test setup) حيث أنك ستجد في علامة التبويب هذه أغلب البيانات التي تم إدخالها مسبقاً ويبقى فقط إدخال خطوة مُغيّر الخطوة (TC) عند بداية الفحص وفي حالتنا هذه نقوم بوضع الرقم (1) وأيضاً إدخال خطوة مُغيّر الخطوة (TC) عند نهاية الفحص وفي حالتنا هذه نقوم بوضع الرقم (17) بالإضافة لنمط الفحص (Mode) حيث يتيح لنا إختيار نمط الفحص ثلاثي الطور التصاعدي أو التنازلي و أحادي الطور التصاعدي أو التنازلي وفي حالتنا هذه تم إختيار ثلاثي الطور تصاعدي كما ويتيح لنا إختيار فولتية الفحص كما هو موضح في الشكل (4-2-16)



الشكل رقم (4-2-16)

28. بعد ذلك يُمكن البدء بالفحص لجميع خطوات المحول بشكل تلقائي بالضغط على زر الفحص (TEST) أحضر اللون لتظهر الشاشة المُبينة في الشكل (4-2-17) وتبدأ لمبة الإشارة الحمراء المبيبة بالشكل (4-2-2) بالوميض إشارة لبدء الفحص وتطبيق الفولتية المترددة.



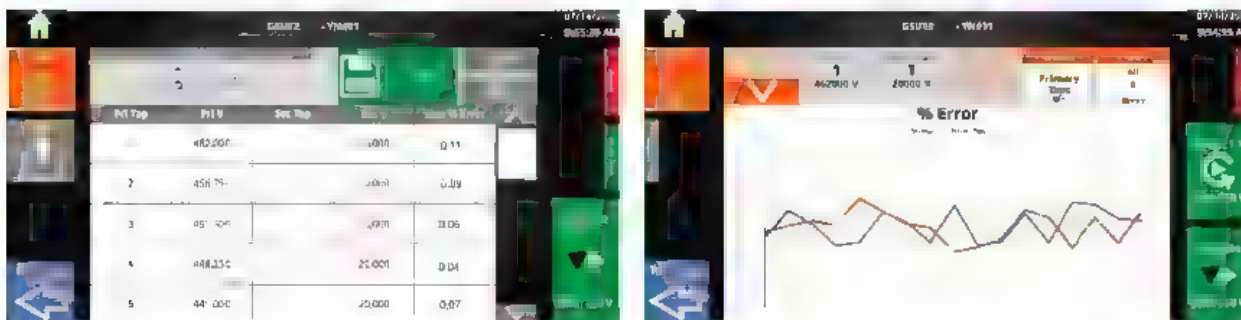
الشكل رقم (4-2-17)

29. عند الإنتهاء من الفحص تظهر شاشة النتائج المُبينة بالشكل (4-2-18)، حيث يُمكن تغيير النسبة المُقاسة من (TNR) إلى (TTR) بالضغط على (Ratio Display) بالإضافة إلى إمكانية التنقل بين الخطوات لرؤية نتائج الفحص بواسطة الأسهم الظاهرة بالشكل.



الشكل رقم (4-2-18)

كما ويُمكن رؤية النتائج على شكل رسم بياني أو جدول بالضغط على زر (View) كما هو مُبين في الشكل (4-2-19).



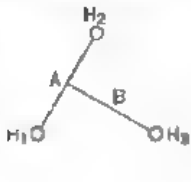
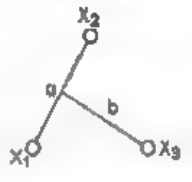
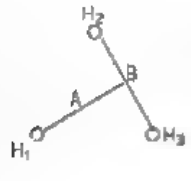
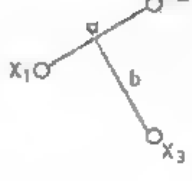
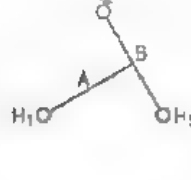

الشكل رقم (4-2-19)

الملحق (4-3)

أطراف حقن الفولتية وقياسها لأغلب مجموعات التوصيل للمحولات كما ورد في الكُتبيات التفصيلية الحاصلة بشركة (MEGGER) وفقاً لمعايير المعهد الأمريكي للمعايير الوطنية (ANSI) فيما يخص تسمية أطراف المحول، وللتسميات الأخرى يمكن الرجوع للجدول في الملحق (1-1) في نهاية الفصل الأول.

Megger.

T-Type Transformers

Table C-1 ANSI Transformer Winding Phase Relationship							
IEC Vector Group	Winding Connection		External Jumpers	Phase tested	Winding Tested		Calculated Turn Ratio
	High Voltage Winding (H)	Low Voltage Winding (X)			High Voltage Winding	Low Voltage Winding	
T-T 0			-	A	H ₁ - H ₂	X ₁ - X ₂	$\frac{V_H}{V_X}$
				B	H ₁ - H ₃	X ₁ - X ₃	$\frac{V_H}{V_X}$
T-T 30 lag			H ₂ - H ₃	A	H ₁ - H ₃	X ₁ - X ₂	$\frac{V_H}{V_X} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$
				B	H ₂ - H ₃	X ₁ - X ₃	$\frac{V_H}{V_X} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}}$
T-T 30 lead			H ₂ - H ₃	A	H ₁ - H ₃	X ₁ - X ₃	$\frac{V_H}{V_X} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$
				B	H ₂ - H ₃	X ₂ - X ₁	$\frac{V_H}{V_X} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}}$

Megger.

Table C-2. ANSI Transformer Winding Phase Relationship									
Copyright © 2009 Megger									
Diag No	IEC Vector Group	Winding Connection		Phase Tested	Winding Shorted By TTR	Winding Test(s)		Measured Turn Ratio	Remarks
		High Voltage Winding (H)	Low Voltage Winding (X)			High Voltage Winding	Low Voltage Winding		
1	1 1ph0			1		H ₁ - H ₂	X ₁ - X ₂	$\frac{V_H}{V_X}$	Single-phase transformer
2	1 1ph6			1		H ₁ - H ₂	X ₂ - X ₁	$\frac{V_H}{V_X}$	Single-phase transformer
3	Dd0			A B C		H ₁ - H _a H ₂ - H _b H ₃ - H _c	X ₁ - X _a X ₂ - X _b X ₃ - X _c	$\frac{V_H}{V_X}$	
4	Dd6			A B C		H ₁ - H _a H ₂ - H _b H ₃ - H _c	X ₃ - X ₁ X ₁ - X ₂ X ₂ - X ₃	$\frac{V_H}{V_X}$	
5	Dyn1			A B C		H ₁ - H _a H ₂ - H _b H ₃ - H _c	X ₁ - X ₀ X ₂ - X ₀ X ₃ - X ₀	$\frac{V_H \cdot \sqrt{3}}{V_X}$	Neutral accessible on wye winding
6	Dyn7			A B C		H ₁ - H _a H ₂ - H _b H ₃ - H _c	X ₀ - X ₁ X ₀ - X ₂ X ₀ - X ₃	$\frac{V_H \cdot \sqrt{3}}{V_X}$	Neutral accessible on wye winding
7	YNyn0			A B C		H ₁ - H ₀ H ₂ - H ₀ H ₃ - H ₀	X ₁ - X ₀ X ₂ - X ₀ X ₃ - X ₀	$\frac{V_H}{V_X}$	Neutral accessible both wye windings

Table C-2. ANSI Transformer Winding Phase Relationship									
Copyright 2009 Megger									
Diag No.	IEC Vector Group	Winding Connection		Phase Tested	Winding Shorted By TTR	Winding Tested		Measured Turn Ratio	Remarks
		High-Voltage Winding (H)	Low-Voltage Winding (X)			High-Voltage Winding	Low-Voltage Winding		
8	YNyn6			A B C		H ₁ H ₀ H ₂ H ₀ H ₃ H ₀	X ₀ X ₁ X ₀ X ₂ X ₀ X ₃	$\frac{V_H}{V_X}$	Neutral accessible both wye windings
9	YNd1			A B C		H ₁ H ₀ H ₂ H ₀ H ₃ H ₀	X ₁ X ₂ X ₂ X ₃ X ₃ X ₁	$\frac{V_H}{V_X \cdot \sqrt{3}}$	Neutral accessible on wye winding
10	YNd7			A B C		H ₁ H ₀ H ₂ H ₀ H ₃ H ₀	X ₁ X ₂ X ₂ X ₃ X ₃ X ₁	$\frac{V_H}{V_X \cdot \sqrt{3}}$	Neutral accessible on wye winding
11	Dy1			A B C	H ₁ H ₂ H ₂ H ₃ H ₃ H ₁	H ₁ (H ₂ -H ₃) H ₂ (H ₃ -H ₁) H ₃ (H ₁ -H ₂)	X ₀ X ₁ X ₀ X ₂ X ₀ X ₃	$\frac{V_H \cdot \sqrt{3}}{V_X}$	No accessible neutral on wye winding
12	Dyn5			A B C	H ₁ H ₂ H ₂ H ₃ H ₃ H ₁	H ₁ H ₀ H ₂ H ₀ H ₃ H ₀	X ₀ X ₁ X ₀ X ₂ X ₀ X ₃	$\frac{V_H \cdot \sqrt{3}}{V_X}$	Neutral accessible on wye winding
13	Dy5			A B C	H ₁ H ₂ H ₂ H ₃ H ₃ H ₁	H ₁ (H ₂ -H ₃) H ₂ (H ₃ -H ₁) H ₃ (H ₁ -H ₂)	X ₀ X ₁ X ₀ X ₂ X ₀ X ₃	$\frac{V_H \cdot \sqrt{3}}{V_X}$	No accessible neutral on wye winding

Table C-2. ANSI Transformer Winding Phase Relationship

Diagram No	IEC Vector Group	Winding Connection		Phase Tested	Winding Shorted By TTR	Winding Tested		Measured Turn Ratio	Remarks
		High-Voltage Winding (H)	Low-Voltage Winding (X)			High-Voltage Winding	Low-Voltage Winding		
14	Dy7			A B C	H ₂ - H ₁ H ₁ - H ₃ H ₂ - H ₃	H ₁ - (H ₂ - H ₃) H ₂ - (H ₁ - H ₃) H ₃ - (H ₂ - H ₁)	X ₀ - X ₁ X ₁ - X ₂ X ₂ - X ₃	$\frac{V_H \cdot \sqrt{3}}{V_X}$	No accessible neutral on wye winding
15	Dyn11			A B C	H ₂ - H ₁ H ₁ - H ₃ H ₂ - H ₃	H ₁ - (H ₂ - H ₃) H ₂ - (H ₁ - H ₃) H ₃ - (H ₂ - H ₁)	X ₀ - X ₃ X ₀ - X ₁ X ₀ - X ₂	$\frac{V_H \cdot \sqrt{3}}{V_X}$	Neutral accessible on wye winding
16	Dy11			A B C	H ₂ - H ₁ H ₁ - H ₃ H ₂ - H ₃	H ₁ - (H ₂ - H ₃) H ₂ - (H ₁ - H ₃) H ₃ - (H ₂ - H ₁)	X ₂ - X ₃ X ₀ - X ₁ X ₀ - X ₂	$\frac{V_H \cdot \sqrt{3}}{V_X}$	No accessible neutral on wye winding
17	Dz0			A+C B+A C+B	H ₂ - H ₁ H ₁ - H ₃ H ₂ - H ₃	H ₁ - (H ₂ - H ₃) H ₂ - (H ₁ - H ₃) H ₃ - (H ₂ - H ₁)	X ₁ - X ₀ X ₀ - X ₁ X ₀ - X ₂	$\frac{V_H}{V_X}$	No accessible neutral
18	Dz6			A+C B+A C+B	H ₂ - H ₁ H ₁ - H ₃ H ₂ - H ₃	H ₁ - (H ₂ - H ₃) H ₂ - (H ₁ - H ₃) H ₃ - (H ₂ - H ₁)	X ₂ - X ₁ X ₁ - X ₂ X ₂ - X ₃	$\frac{V_H}{V_X}$	No accessible neutral
19	YNy0			A B C	H ₂ - H ₀ H ₀ - H ₃ H ₁ - H ₀	H ₁ - (H ₂ - H ₀) H ₂ - (H ₁ - H ₀) H ₃ - (H ₁ - H ₀)	X ₁ - X ₂ X ₂ - X ₃ X ₃ - X ₁	$\frac{V_H}{V_X}$	Neutral accessible on low voltage winding

Table C-2. ANSI Transformer Winding Phase Relationship

Diag No	IEC Vector Group	Winding Connection		Phase Tested	Winding Shorted By TTR	Winding Tested		Measured Turn Ratio	Remarks
		High Voltage Winding (H)	Low Voltage Winding (X)			High Voltage Winding	Low Voltage Winding		
20	Yyn0			A+C B+A C+B		H ₁ H ₃ H ₂ H ₁ H ₃ H ₂	X ₁ X ₃ X ₂ X ₁ X ₃ X ₂	$\frac{V_H}{V_X}$	No accessible neutral on high voltage winding
21	Yy0			A B C		H ₁ H ₃ H ₂ - H ₁ H ₃ H ₂	X ₁ X ₃ X ₂ - X ₁ X ₃ X ₂	$\frac{V_H}{V_X}$	No accessible neutral both wye windings
22	YNy6			A B C	H ₂ - H ₀ H ₃ - H ₀ H ₁ H ₀	H ₁ (H ₂ -H ₀) H ₂ -(H ₃ -H ₀) H ₃ -(H ₁ -H ₀)	X ₂ X ₁ X ₃ - X ₂ X ₁ X ₃	$\frac{V_H}{V_X}$	No accessible neutral on low-voltage winding
23	Yyn6			A+C B+A C+B		H ₁ H ₃ H ₂ - H ₁ H ₃ - H ₂	X ₃ X ₁ X ₁ X ₂ X ₂ - X ₃	$\frac{V_H}{V_X}$	No accessible neutral on high-voltage winding
24	Yy6			A+C B+A C+B		H ₁ H ₃ H ₂ - H ₁ H ₃ H ₂	X ₃ X ₁ X ₁ - X ₂ X ₂ X ₃	$\frac{V_H}{V_X}$	No accessible neutral on both wye windings
25	Yzn1			A B C		H ₁ H ₃ H ₂ H ₁ H ₃ H ₂	X ₁ X ₃ X ₂ X ₀ X ₃ X ₀	$\frac{V_H \cdot \sqrt{3}}{V_X}$	No accessible neutral on wye winding

Table C-2. ANSI Transformer Winding Phase Relationship									
Copyright 2009 Megger									
Diagram No	IEC Vector Group	Winding Connection		Phase Tested	Winding Shorted By TTR	Winding Tested		Measured Turn Ratio	Remarks
		High Voltage Winding (H)	Low voltage Winding (X)			High Voltage Winding	Low Voltage Winding		
26	Yz1			A+B B+C C+A	H ₃ - H ₂ H ₁ - H ₃ H ₂ - H ₁	H ₁ - (I ₃ + H ₂) H ₂ - (H ₁ + H ₃) H ₃ - (H ₂ + H ₁)	X ₁ - X ₂ X ₂ - X ₃ X ₃ - X ₁	$\frac{V_H}{V_X} = \frac{\sqrt{3}}{2}$	No accessible neutral
27	Yzn6			A B C		H ₁ - H ₃ H ₂ - H ₁ H ₃ - H ₂	X ₁ - X ₂ X ₂ - X ₃ X ₃ - X ₁	$\frac{V_H}{V_X} = \frac{\sqrt{3}}{2}$	No accessible neutral on wye winding
28	Yz5			A+B B+C C+A	H ₃ - H ₂ H ₁ - H ₃ H ₂ - H ₁	H ₁ - (I ₃ + H ₂) H ₂ - (H ₁ + H ₃) H ₃ - (H ₂ + H ₁)	X ₁ - X ₂ X ₂ - X ₃ X ₃ - X ₁	$\frac{V_H}{V_X} = \frac{\sqrt{3}}{2}$	No accessible neutral
29	Yzn7			A B C		H ₁ - H ₃ H ₂ - H ₁ H ₃ - H ₂	X ₁ - X ₂ X ₂ - X ₃ X ₃ - X ₁	$\frac{V_H}{V_X} = \frac{\sqrt{3}}{2}$	No accessible neutral on wye winding
30	Yz7			A+B B+C C+A	H ₃ - H ₂ H ₁ - H ₃ H ₂ - H ₁	H ₁ - (H ₃ + H ₂) H ₂ - (H ₁ + H ₃) H ₃ - (H ₂ + H ₁)	X ₁ - X ₂ X ₂ - X ₃ X ₃ - X ₁	$\frac{V_H}{V_X} = \frac{\sqrt{3}}{2}$	No accessible neutral
31	Yzn11			A B C		H ₁ - H ₃ H ₂ - H ₁ H ₃ - H ₂	X ₁ - X ₂ X ₂ - X ₃ X ₃ - X ₁	$\frac{V_H}{V_X} = \frac{\sqrt{3}}{2}$	No accessible neutral on wye winding

Table C-2. ANSI Transformer Winding Phase Relationship

Diagram No.	IFC Vector Group	Winding Connection		Phase Tested	Winding Shorted By TTR	Winding Tested		Measured Turn Ratio	Remarks
		High-Voltage Winding (H)	Low-Voltage Winding (X)			High-Voltage Winding	Low-Voltage Winding		
20	Yyn0			A+C B+A C+B		H ₁ - H ₂ H ₂ - H ₁ H ₂ - H ₂	X ₁ - X ₂ X ₂ - X ₁ X ₃ - X ₂	$\frac{V_H}{V_X}$	No accessible neutral on high-voltage winding
21	Yy0			A B C		H ₁ - H ₃ H ₂ - H ₁ H ₃ - H ₂	X ₁ - X ₃ X ₂ - X ₁ X ₃ - X ₂	$\frac{V_H}{V_X}$	No accessible neutral both wye windings
22	YNy6			A B C	H ₂ - H ₀ H ₃ - H ₀ H ₁ - H ₀	H ₁ - (H ₂ -H ₀) H ₂ - (H ₃ -H ₀) H ₃ - (H ₁ -H ₀)	X ₂ - X ₁ X ₃ - X ₂ X ₁ - X ₃	$\frac{V_H}{V_X}$	No accessible neutral on low-voltage winding
23	Yyn6			A+C B+A C+B		H ₁ - H ₂ H ₂ - H ₁ H ₂ - H ₂	X ₃ - X ₁ X ₁ - X ₂ X ₂ - X ₃	$\frac{V_H}{V_X}$	No accessible neutral on high-voltage winding
24	Yy6			A+C B+A C+B		H ₁ - H ₃ H ₂ - H ₁ H ₂ - H ₂	X ₃ - X ₁ X ₁ - X ₂ X ₂ - X ₃	$\frac{V_H}{V_X}$	No accessible neutral on both wye windings
25	Yzn1			A B C		H ₁ - H ₃ H ₂ - H ₁ H ₃ - H ₂	X ₁ - X ₀ X ₂ - X ₀ X ₃ - X ₀	$\frac{V_H \cdot \sqrt{3}}{V_X}$	No accessible neutral on wye winding

Table C-2. ANSI Transformer Winding Phase Relationship									
Copyright 2009 Megger									
Diag No.	IEC Vector Group	Winding Connection		Phase Tested	Winding Shorted By TTR	Winding Tested		Measured Turn Ratio	Remarks
		High-Voltage Winding (H)	Low-Voltage Winding (X)			High Voltage Winding	Low voltage Winding		
38	YNd5			A B C		H ₁ - H ₀ H ₂ - H ₀ H ₃ - H ₀	X ₂ - X ₁ X ₃ - X ₂ X ₁ - X ₃	$\frac{V_H}{V_X \cdot \sqrt{3}}$	Neutral accessible on wye winding
39	Yd5			A B C	H ₂ - H ₂ H ₁ - H ₃ H ₃ - H ₁	H ₁ - (H ₃ + H ₂) H ₂ - (H ₁ + H ₃) H ₃ - (H ₂ + H ₁)	X ₃ - X ₁ X ₁ - X ₂ X ₂ - X ₃	$\frac{V_H}{V_X} \cdot \frac{1.5}{\sqrt{3}}$	No accessible neutral on wye winding
40	Yd7			A B C	H ₂ - H ₂ H ₁ - H ₃ H ₃ - H ₁	H ₁ - (H ₃ + H ₂) H ₂ - (H ₁ + H ₃) H ₃ - (H ₂ + H ₁)	X ₂ - X ₁ X ₃ - X ₂ X ₁ - X ₃	$\frac{V_H}{V_X} \cdot \frac{1.5}{\sqrt{3}}$	No accessible neutral on wye winding
41	YNd11			A B C		H ₁ - H ₀ H ₂ - H ₀ H ₃ - H ₀	X ₁ - X ₃ X ₂ - X ₁ X ₃ - X ₂	$\frac{V_H}{V_X \cdot \sqrt{3}}$	Neutral accessible on wye winding
42	Yd11			A B C	H ₂ - H ₂ H ₁ - H ₃ H ₃ - H ₁	H ₁ - (H ₃ + H ₂) H ₂ - (H ₁ + H ₃) H ₃ - (H ₂ + H ₁)	X ₁ - X ₃ X ₂ - X ₁ X ₃ - X ₂	$\frac{V_H}{V_X} \cdot \frac{1.5}{\sqrt{3}}$	No accessible neutral on wye winding


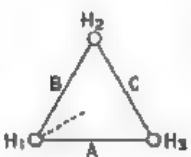
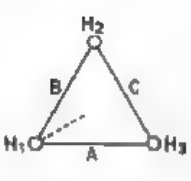
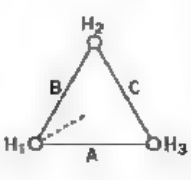
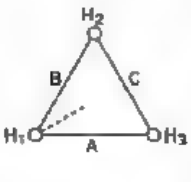
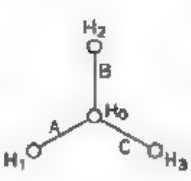
Table C-2. ANSI Transformer Winding Phase Relationship									
Copyright 2009 Megger									
Diag No	IEC Vector Group	Winding Connection		Phase Tested	Winding Shorted By TTR	Winding Tested		Measured Turn Ratio	Remarks
		High Voltage Winding (H)	Low Voltage Winding (X)			High-Voltage Winding	Low-Voltage Winding		
43	VREG			1		S-SL	L-SL	$\frac{V_H}{V_X}$	
44	Dyn3			A B C		H ₁ - H ₂ H ₂ - H ₃ H ₃ - H ₁	X ₀ - X ₂ X ₂ - X ₃ X ₃ - X ₁	$\frac{V_H \cdot \sqrt{3}}{V_X}$	Neutral accessible on wye winding
45	Dy3			A B C		H ₂ - H ₁ H ₁ - H ₃ H ₃ - H ₂	H ₁ - (H ₂ +H ₃) H ₂ - (H ₁ +H ₃) H ₃ - (H ₂ +H ₁)	$\frac{V_H \cdot \sqrt{3}}{V_X}$	No accessible neutral on wye winding
46	Dyn9			A B C		H ₁ - H ₃ H ₂ - H ₁ H ₃ - H ₂	X ₂ - X ₀ X ₃ - X ₀ X ₁ - X ₀	$\frac{V_H}{V_X \cdot \sqrt{3}}$	Neutral accessible on wye winding
47	Dy9			A B C		H ₂ - H ₃ H ₁ - H ₃ H ₂ - H ₁	H ₁ - (H ₂ +H ₃) H ₂ - (H ₁ +H ₃) H ₃ - (H ₂ +H ₁)	$\frac{V_H \cdot \sqrt{3}}{V_X}$	No accessible neutral on wye winding
48	YNzn1			A B C		H ₁ - H ₃ H ₂ - H ₁ H ₃ - H ₂	X ₁ - X ₀ X ₂ - X ₀ X ₃ - X ₀	$\frac{V_H \cdot \sqrt{3}}{V_X}$	Neutral accessible on wye winding

Table C-2. ANSI Transformer Winding Phase Relationship									
Diag No	EC Vector Group	Winding Connection		Phase Tested	Winding Shorted By TTR	Winding Tested		Measured Turn Ratio	Remarks
		High-Voltage Winding (H)	Low-Voltage Winding (X)			High-Voltage Winding	Low Voltage Winding		
49	YNzn7			A B C		H ₁ H ₃ H ₂ H ₁ H ₃ H ₂	X ₀ X ₃ X ₀ X ₂ X ₀ X ₁	$\frac{V_H + \sqrt{3}}{V_X}$	Neutral accessible on wye winding
50	YNzn11			A B C		H ₁ H ₃ H ₂ H ₁ H ₃ H ₂	X ₀ X ₃ X ₀ X ₂ X ₀ X ₁	$\frac{V_H + \sqrt{3}}{V_X}$	Neutral accessible on wye winding
51	YNd3			A B C		H ₁ H ₀ H ₂ H ₀ H ₃ H ₀	X ₂ X ₃ X ₁ X ₃ X ₂ X ₁	$\frac{V_H}{V_X + \sqrt{3}}$	Neutral accessible on wye winding
52	YNdB			A B C		H ₁ -H ₃ H ₂ H ₀ H ₃ -H ₀	X ₂ -X ₃ X ₁ X ₂ X ₁ X ₃	$\frac{V_H}{V_X + \sqrt{3}}$	Neutral accessible on wye winding
53	Yd3			A B C	H ₃ -H ₂ H ₁ H ₃ H ₂ H ₁	H ₁ -(H ₂ +H ₃) H ₂ -(H ₃ +H ₁) H ₃ -(H ₁ +H ₂)	X ₂ -X ₃ X ₁ -X ₃ X ₂ -X ₁	$\frac{V_H + 1.5}{V_X + \sqrt{3}}$	No accessible neutral on wye winding
54	Yd9			A B C	H ₃ -H ₂ H ₁ H ₃ H ₂ H ₁	H ₁ -(H ₂ +H ₃) H ₂ -(H ₃ +H ₁) H ₃ -(H ₁ +H ₂)	X ₂ -X ₃ X ₁ -X ₃ X ₂ -X ₁	$\frac{V_H + 1.5}{V_X + \sqrt{3}}$	No accessible neutral on wye winding
55	YNyn2			A B C	—	H ₁ -H ₀ H ₂ H ₀ H ₃ H ₀	X ₀ -X ₂ X ₀ -X ₃ X ₀ X ₁	$\frac{V_H}{V_X}$	Neutral accessible both wye windings
56	YNynB			A B C	—	H ₁ H ₀ H ₂ -H ₀ H ₃ -H ₀	X ₂ X ₀ X ₃ -X ₀ X ₁ X ₀	$\frac{V_H}{V_X}$	Neutral accessible both wye windings

الفصل الخامس

فحص معامل التبديد/القدرة و المواسعة

Dissipation/Power Factor & Capacitance
test (Tan δ - PF)



فحص معامل التبديد/القدرة والمواسعة

Dissipation/Power Factor & Capacitance test (Tanδ - PF)

تُعتبر المادة العازلة في المحول من مكونات المحول الأكثر أهمية لما لها من تأثير على أمن وموثوقية عمل المحول وما يعكس عن ذلك من تأثير على موثوقية الشبكة الكهربائية ككل، كما وأن العمر التشغيلي للمحول يُقدَّر تبعاً لحالة المادة العازلة داخله، لذلك لا بُد من الكشف عن حالة هذه المادة العازلة من فترة لأخرى وذلك للتأكد من سلامة المحول وتتبع تقدمه التدريجي المُتلائم مع تقدم المادة العازلة.

لذلك يُعتبر فحص معامل التبديد/القدرة عند التردد الإسمي من الفحوصات المهمة في هذه الشأن، حيث أنه يهدف إلى معرفة مدى جودة وكفاءة العزل الكهربائي لملفات المحول أو لعوازل الإختراق أو كما تُسمى بجُلب المحول (**Bushings**) بشكل عام، كما ويُقصد بالمادة العازلة عند الحديث عن المحولات جميع مكونات نظام العزل والتي تصم الزيت و العزل الصلب للملفات بأنواعه المختلفة بالإضافة للعزل الخاص بعوازل الإختراق كالبورسلان وغيره من مواد العزل للمحول.

وتكمن فلسفة هذا الفحص بشكل مُبسط في قياس نسبة الطاقة الصائبة في المادة العازلة إلى الطاقة الكُلية المُطبقة عليها أو ما يُسمى بحسائر العزل (**Dielectric Loss**)، ويُمكن التعبير عنها بنسبة مئوية من (صفر) إلى (100%) بالمئة بحيث يدل الصفر على أن المادة العازلة نظيفة وحافة ولا تحتوي على فحوات بالإضافة إلى أنها خالية من أية دلائل على أنها غير قادرة على القيام بوظيفتها الأساسية وهي تأمين العزل المطلوب بين أجزاء المحول الفعالة المختلفة. كما وتُجدر الإشارة إلى أن هذا الفحص لا يُعتبر من فحوصات (**go-no-go tests**) أي أن مخرجاته لا تكون على شاكلة (1 - 0) أو (ناجح - راسب) وإنما تكون على شكل تدرج مئوي كما ذُكر سابقاً من خلاله يتم تحديد حالة المادة العازلة ودرجة تقدمها.

تم إستخدام فحص معامل القدرة (**Power Factor - PF**) لأول مرة في أوائل القرن الماضي (1900's) من قِبل مُصنعي الكوابل وتم إستخدامه في مجال فحص عوازل إحتراق المحولات (**Bushings**) منذ عام (1929)، أما فيما يخص فحص معامل التبديد (**Dissipation Factor - DF**) فإنه يعتمد على قنطرة شيرنج (**Schering bridge**) التي تم تطويرها هي الأخرى في أوائل القرن الماضي (1900's) لتقييم حالة المادة العازلة بواسطة فصل مُركبيتي تيار الشحن السُعوية (**Capacitive**) والمادية (**Resistive**) للمادة العازلة.

إن فحص معامل التبديد/القدرة يتم بتطبيق فولتية مترددة (**AC**) قد تصل لـ (10kV) كيلو فولت ذات تردد مساوٍ للتردد التشغيلي للمحول (50Hz) هيرتز، وذلك بصدد معرفة سلوك المادة العازلة أثناء عمل المحول بشكل طبيعي وتعرضه للفولتية بالتردد التشغيلي، كما وتُجدر الإشارة إلى أن هذا الفحص من الفحوصات التي لا تعتمد على الزمن كفحوصات الفولتية الثابتة (**DC**) سابقة الذكر. وبما أن مقدار فولتية الفحص أقل من قيمة الفولتية الإسمية الخاصة بالمحول فإن هذا الفحص يُعتبر من الفحوصات غير التدميرية (**Non-destructive test**) أي أنه لا يؤثر على سلامة العزل للمحول.

وفي ثانياً عملية قياس معامل التبريد/القدرة يتم إستخراج قيمة المواسعة والتي تُعد من القيم المهمة التي من خلالها يتم الكشف عن الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للمحول، لذلك يُمكن ملاحظة أن هذا الفحص ينطوي على فحصين أولهما هو فحص معامل التبريد/القدرة و ثانيهما هو فحص المواسعة.

وكما ذكر سابقاً فإن سلامة أي محول تتلخص في سلامة ثلاثة أنظمة داخلية للمحول وهي نظام العزل والنظام الميكانيكي والنظام الحراري، حيث أن أي فشل في أي من هذه الأنظمة سيؤدي إلى فشل المحول بالكامل، وهذا الفحص يُمكن من الكشف عن سلامة نظام العزل وتتبع تقدمه بالإضافة إلى الكشف عن سلامة النظام الميكانيكي كما سيتم شرحه لاحقاً.

1. متى يتم إجراء هذا الفحص ولماذا؟

هناك عدة أسباب تدفعنا لإجراء هذا الفحص ومن هذه الأسباب ما هو روتيني للتأكد من سلامة المحول أو تشخيصي لتحديد الأعطال في المحول (وهو مجال بحثنا في هذا الكتاب) أو لأسباب خاصة أخرى، وتتلخص هذه الأسباب بالآتي:

1.1 في المصنع لضبط الجودة القمصنية (Quality Control - QC) وكذلك يُعتبر من فحوصات القبول القمصنية (Factory Acceptance Test - FAT) للتأكد من سلامة المحول ومطابقته للتصميم قبل نقله للموقع.

1.2 في الموقع قبل كهرية المحول للمرة الأولى (Transformer first energization) كأحد فحوصات القبول الموقعية (Site Acceptance Test - SAT) للتأكد من سلامة المحول بعد نقله وتركيبه في الموقع.

1.3 قبل كهرية المحول (Transformer energization) بعد عمليات الصيانة المُختلفة في الموقع.

1.4 بشكل روتيني (Routine test) وذلك للكشف عن وضع المحول الحالي وإستخدام نتيجة هذا الفحص كمرجع (Reference value).

1.5 تحديد الأعطال داخل المحول (Fault detection - Diagnostic test)، وهو ما سيتم تناوله في هذا الفصل.

2. الدوافع التشخيصية لعمل هذا الفحص وما هي الأعطال التي يتم الكشف عنها

كما هو معلوم أن هذا الفحص يهدف للكشف عن حالة هذه المادة العازلة (PF/DF) بالإضافة لحالة القلب الحديدي والملفات الفيزيائية (Capacitance)، لذلك عادةً ما يتم اللجوء لعمل هذا الفحص بهدف تشخيصي في حال تعرّض المحول لطروف أو أحداث قد تؤدي لزيادة الإجهاد الميكانيكي الواقع على ملفات وقلب المحول الحديدي وما يترتب عليها من أعطال ميكانيكية أو كهربائية للمحول، وعلى سبيل المثال لا الحصر يُمكن إيجاد الأمور التالية:

- ظهور نتائج غير مُرضية لفحص نسبة محتوى الماء في ريت المحول (Water content test).
- تعرّض المحول لإجهاد ميكانيكي ناتج عن عطل كهربائي مثل الأعطال الأرضية (Earth faults) أو أعطال القصر (Short circuit) أو ضربات البرق (Lightning) وما ينتج عنها من تيارات ذات قيم مُرتفعة، أو تعرّض المحول لتيارات بدء (تدفق) مُرتفعة (High inrush currents).
- تعرّض المحول لفصل قسري (Trip) نتيجة لتفعل مُرحل البوخلز (Buchholz relay) أو مُرحل إرتفاع الضغط المفاجئ (Sudden pressure relay) أو غيره من الحماية الفيزيائية.
- قراءات غير جيدة لحهار تسجيل الصدمات (Impact recorder)، حيث أن هذه الجهاز يتم تثبيته على جسم المحول أثناء نقله للتأكد من عدم تعرّض المحول للصدمات فوق الحدود المسموح بها كتعرضه لصدمة ميكانيكية كبيرة كالسقوط أثناء عملية النقل.
- الهزات الناتجة عن الزلازل أو غيرها من الكوارث الطبيعية والتي قد تُلحق ضرراً ميكانيكياً بالمحول.

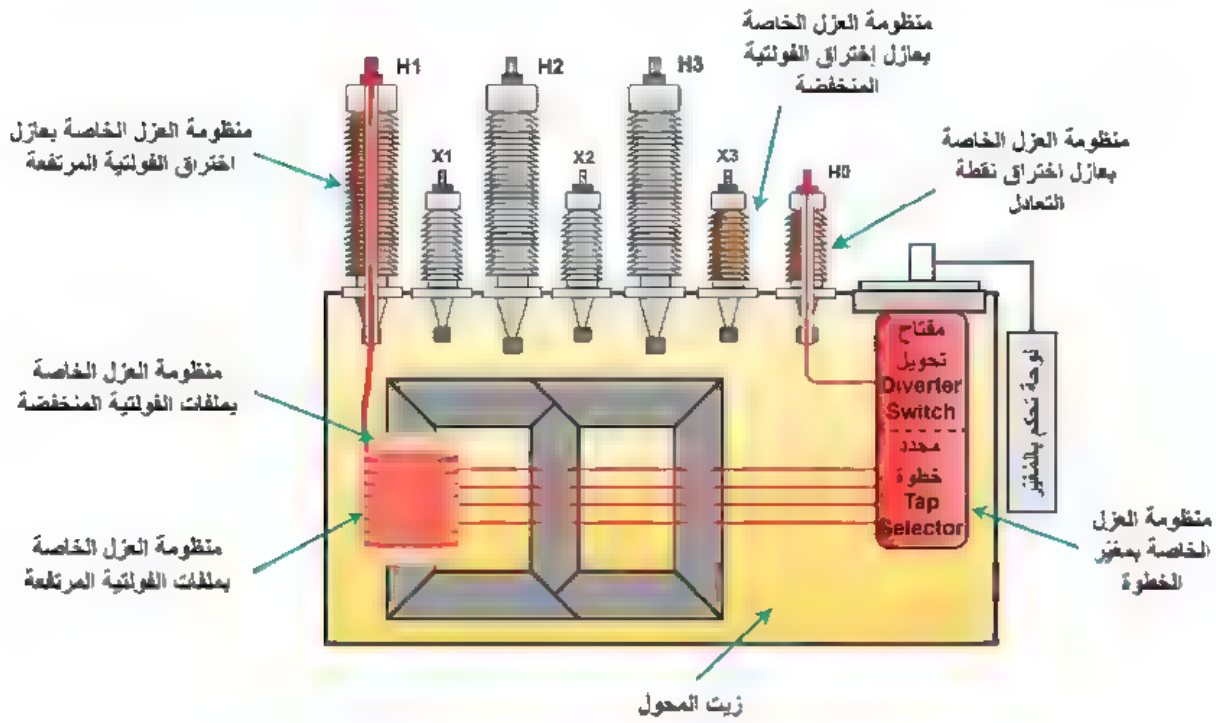
ومن الأعطال التي يتم الكشف عنها من خلال هذا الفحص:

- فحص معامل التبديد/القدرة (Dissipation/Power Factor DF&PF)
 - ✓ محول ذو عزل رطب (Wet/Moist insulation).
 - ✓ محول ذو عزل مُتضرر نتيجة للكورونا أو التكرين (Carbonization).
 - ✓ محول ذو زيت مؤكسد أو ملوث بالجزئيات أو الحمض أو الماء.
 - ✓ وجود تفرغ جري أو نقاط توصيل رديئة لعازل إحتراق المحول (Bad contact on Bushing test tap and partial discharge).
 - ✓ وجود تشققات في عوازل إحتراق المحول (Bushings).
 - ✓ فقدان الزيت داخل عوازل إحتراق المحول (Bushings).
 - ✓ قصر في (Condenser) عوازل إحتراق المحول (Bushings) أو إنهيار في طبقاتها الداخلية.
 - ✓ وجود كورونا في عوازل إحتراق المحول (Bushings).
- فحص المواسعة (Capacitance)
 - ✓ قياس المواسعة بين الملفات (Winding to winding) تُمكن من الكشف عن وجود أي تغيّر في الخصائص العيزيائية والهندسية لهذه الملفات، أي بمعنى آخر أنها تكشف عن وجود تغيير على موقع هذه الملفات كإختلاف المسافة الفاصلة فيما بينها نتيجة لتعرضها لإجهاد ميكانيكي كالصدمات أو مرور تيار عطل مرتفع خلال هذه الملفات.
 - ✓ قياس المواسعة بين الملفات والأرضي (Winding to ground) تُمكن من الكشف عن أية تغيير على المسافة الفاصلة بين الملفات والأرضي نتيجة لتعرضها لإجهاد ميكانيكي كالصدمات أو مرور تيار عطل مرتفع خلال هذه الملفات.
 - ✓ قياس المواسعة بين القلب الحديدي والأرضي (Core to ground) تُمكن من الكشف عن أي تغيير لموقع القلب الحديدي بالنسبة للخزان الرئيسي نتيجة لتعرضه لإجهاد ميكانيكي.

✓ قياس المواسعة الخاصة بعوارل إختراق الفولتية المرتفعة (High voltage bushings) يُمكن من الكشف عن وجود إبهيار أو قصر (Short circuit) بين طبقات الألميوم المكونة لهذا النوع من العوارل (Bushing).

وبشكل عام فإن فحص المواسعة يُمكن من الكشف عن وجود تغيّرات فيزيائية (ميكانيكية) للقلب الحديدي والملفات، كما ويُعتبر هذا الفحص أكثر حساسية في الكشف عن التشوّه الشعاعي/القطري (Radial deformation) للملفات أكثر من غيره من التشوهات التي قد تطرأ لملفات المحول.

وبين الشكل (5-1) مثال على منظومة العزل التي يتم إختبارها من خلال هذا الفحص للمحولات ثلاثية الطور ثنائية الملفات.



الشكل رقم (5-1)

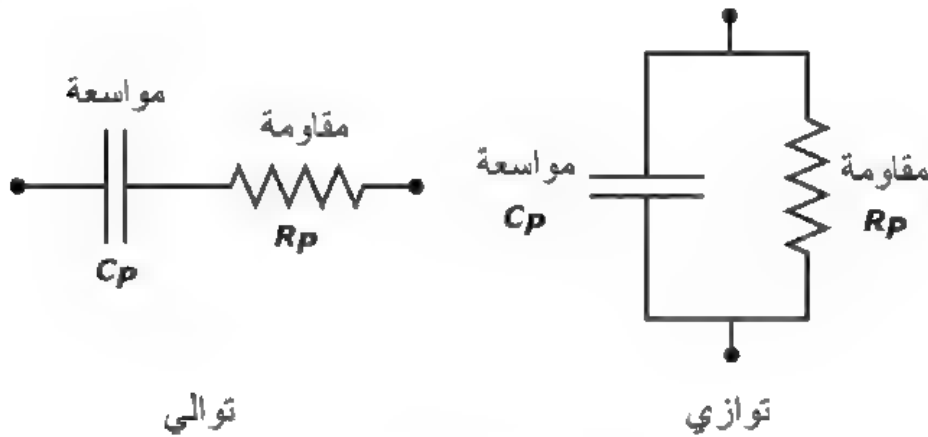
3. فلسفة الفحص

تكون المادة العازلة قادرة على إعطاء عزل كهربائي أفضل عندما تكون نطيعة وجافة ولا تحتوي على فجوات، وكذلك عندما تعمل ضمن حدود درجات الحرارة المسموح بها لهذه المادة العازلة، لذلك يُمكن القول أن أعداء المادة العازلة الأساسيين هم الحرارة والرطوبة والأكسجين.

فبعد تلوث المادة العازلة فإن التيار التسريبي المادي (I_r - Current Resistive Component) المار من خلالها يزداد نتيجة لزيادة موصليتها الكهربائية، والذي بدوره يزيد من قيمة الطاقة الصائغة في العازل والتي تكون على شكل حرارة. وعندما تكون الطاقة الصائغة في العازل أكبر من الطاقة المخزنة في هذا العازل فإنه يبدأ بالتلف وتزداد الطاقة الصائغة أكثر فأكثر مما يزيد من قيمة معامل القدرة لهذه المادة. فمثلاً لو افترضنا تطبيق فولتية مقدارها (10kV) على مادة عازلة وكان التيار التسريبي المادي عبر هذه المادة العازلة

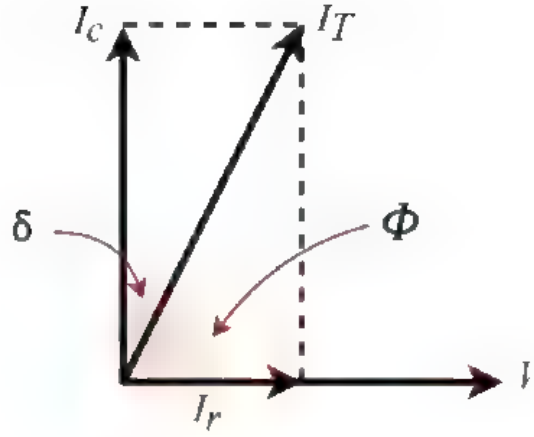
مساوي (2mA) فإن الطاقة المُبددة أو الضائعة في هذه المادة العازلة على شكل حرارة ستساوي (20Wh) واط-ساعة أي ما مقداره (72kJ) كيلوجول، حيث أن هذه الحرارة تعمل على إضعاف المادة العازلة وإستهلاكها مع الزمن مما يزيد من قيمة التيار التسريبي ويزيد من الحرارة المُبددة في العازل أكثر وأكثر مؤدياً لتلفه. لذلك يُمكن القول أن ارتفاع قيمة معامل القدرة للمادة العازلة يُعتبر من الأدلة القوية على وجود تلف في هذه المادة العازلة.

بناءً على ما سبق و نتيجة لإعتبار المادة العازلة مخزنة للطاقة وكذلك بالرجوع الى تعريف المادة العازلة حسب معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE) على أنها مادة تأمن عزل كهربائي بين جزئين مختلفين بالفولتية، حيث أن مصطلح (العزل الكهربائي) الوارد في التعريف السابق يعني أن التيار التسريبي (I_r) المار من خلال هذه المادة العازلة نظرياً مساوٍ للصفر (Zero Conductivity – Zero Absorption)، لذلك يُمكن تمثيل المادة العازلة المثالية (عديمة الضياعات) عن طريق المواسعة الكهربائية فقط، وكما هو معلوم ونظراً لصعوبة وجود مادة عازلة مثالية وذلك بسبب الرطوبة والملوثات وقطبية جزيئات المادة العازلة المتأصلة، عادةً ما يتم تمثيل المادة العازلة بمواسعة كهربائية كما سبق والتي تُمثل خصائص المادة العازلة الفيزيائية وهندسياتها، بالإضافة لمقاومة كهربائية موصولة على التوالي أو التوازي والتي تُمثل مُركبة الضياعات لهذه المادة العازلة أو كما تُسمى بخسائر العازل (Dielectric Loss) كما هو مبين بالشكل (5-2) حيث سيتم اعتماد المواسعة الموصولة على التوازي مع المقاومة الكهربائية كدائرة مُكافئة للمادة العازلة أثناء الشرح.



الشكل رقم (5-2)

كما هو معلوم فإنه عند تطبيق فولتية مترددة (AC) على المادة العازلة تقوم هذه المادة العازلة بسحب تيار شحن (Charging current) مكون من مُركبتين الأولى سَعَوِيَّة (Capacitive) والثانية مادية (Resistive) بحيث تكون مركبة تيار الشحن السَعَوِيَّة مُتقدمة على الفولتية المُطبَّقة بمقدار (90°) درجة وتكون مركبة تيار الشحن المادية مطبقة متجهياً (in-phase) مع الفولتية المُطبَّقة كما يظهر بالشكل (5-3).



الشكل رقم (3-5)

• مركبة التيار السعوية – Capacitive current component

يُمثل هذا التيار الطاقة المخزنة في المادة العازلة وتتناسب قيمته طردياً مع الفولتية المُطبَّقة على المادة العازلة وثابت العزل لهذه المادة العازلة (**Dielectric constant**) وكذلك مساحة سطح المادة العازلة، وتتناسب عكسياً مع سماكة المادة العازلة. كما ويُمكن حساب قيمة هذا التيار السعوي بتطبيق المعادلة (5.2) التالية:

$$I_C = \frac{E}{X_C} = E\omega C \quad (5.1)$$

$$I_C = E2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r \left(\frac{A}{d} \right) \quad (5.2)$$

حيث؛

E : الفولتية المُطبَّقة على المادة العازلة.

f : التردد.

ϵ_0 : ثابت العزل للفراغ ($0.08854 \times 10^{-12} \text{ F/cm}$).

ϵ_r : ثابت العزل للمادة العازلة.

A : المساحة.

d : سماكة المادة العازلة.

ومنه فإن أي تغَيُّر في قيمة تيار الشحن السعوي يُعد دليلاً على تدهور المادة العازلة نتيج لرطوبتها المرتفعة (**wetness**) أو وجود طبقات مقصورة (**Shorted layers**) أو حدوث إختلاف في أبعاد المادة العازلة الهندسية.

• مركبة التيار المادية – Resistive current component

يُمثل هذا التيار المُتسرب من خلال المادة العازلة الطاقة الضائعة أو ما يُسمى بخسائر العازل (**Dielectric Losses**)، وعادة ما يكون ناتج عن ظواهر مختلفة كظاهرة الكورونا أو التيار السطحي المُتسرب أو

الـ (Carbon tracking) أو الـ (Volumetric leakage)، وكما يظهر بالرسم المتجهي الظاهر في الشكل (5-3) يُمكن ملاحظة أن هذا التيار المادي يكون مطبق متجهياً (in-phase) مع الفولتية المُطبقة، وكلما كانت قيمة هذا التيار المادي مرتفعة كلما كانت قيمة الطاقة الضائعة خلال هذه المادة العازلة مرتفعة، لذلك يتم الإعتماد عليه في هذا الفحص للكشف عن حالة المادة العازلة ودرجة تلوثها.

بناءً على ما سبق فإن خسائر العازل (Dielectric Losses) قد تكون ناتجة عن ظاهرة الكوروما وفي هذه الحالة فإنها تزداد بشكل أُسي (Exponentially) بزيادة الفولتية المُطبقة، أو قد تكون ناتجة عن التلوث بالماء أو الـ (Carbon tracking) وفي هذه الحالة فإنها تزداد تبعاً لمربع الفولتية المُطبقة.

- ويبقى التساؤل المطروح "ما هو معامل القدرة (Power Factor CosPhi - PF)؟ وما هو معامل التبديد (Dissipation Factor TanDelta - DF)؟ وما هي المواسعة (Capacitance)؟"

○ معامل القدرة (Power factor - PF) أو كما يُسمى (CosPhi - Cosφ)

عرّفت اللجنة الكهروتقنية الدولية (IEC) معامل القدرة (PF) على أنه نسبة القدرة الفعالة (Active power) المُمتصة من قبل المادة العازلة إلى القدرة غير الفعالة المُطلقة (Reactive power)، وهذا التعريف يَصِف أيضاً معامل التبديد (DF).

كما وعرّف معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE) معامل القدرة (PF) للمادة العازلة على أنه نسبة القدرة المُبددة في المادة العازلة بوحدة الواط (Watt) إلى حاصل ضرب الفولتية الفعالة بالتيار أو ما يُسمى بالقدرة الظاهرية (Apparent power) بوحدة الفولت أمبير (VA) كما يظهر بالمعادلات التالية:

$$PF = \text{Active Power (watt)} / \text{Apparent Power (VA)} \quad (5.3)$$

$$= \frac{I_r}{I_T} = \frac{1}{\sqrt{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_p \cdot C_p)}} = \text{Cos}(\varphi) \quad (5.4)$$

يُمكن الملاحظة من المعادلات السابقة أن معامل القدرة (PF) مساوٍ للنسبة بين التيار المادي (I_r) و التيار الكلي المار بالدائرة المُكافئة للمادة العازلة (I_T) وهو حاصل مجموع تيار المقاومة والمواسعة، بناءً على ذلك فإن معامل القدرة (PF) ما هو إلا جيب تمام الزاوية ($\text{Cos } \varphi$) الفاصلة بين التيار الكلي والفولتية المُطبقة كما هو موضح بالرسم المتجهي الظاهر في الشكل (5-3) السابق.

ومنه وبما أن معامل القدرة (PF) يتم إحتسابه بقسمة القدرة الفعالة (Active power) على القدرة الظاهرية (Apparent power) فإنه يَصِف كفاءة هذه المادة العازلة (Efficiency) مما يُعطي معلومات إضافية عن حالة المادة العازلة ومستوى تقادمها عبر تتبّع كفاءتها مع الزمن وتحت الظروف الطبيعية وغير الطبيعية التي تتعرض لها المادة العازلة أثناء عملها أو نقلها أو تخزينها.

○ معامل التبديد (Dissipation factor - DF) أو كما يُسمى (TanDelta - Tan δ)

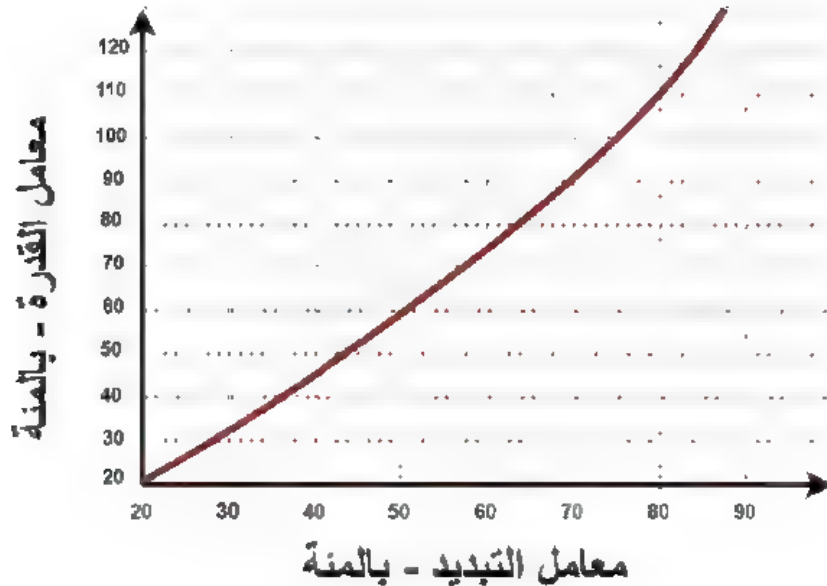
عند تطبيق طاقة كهربائية على نظام العزل والذي سبق وأن تم تمثيله على أنه مواسعة موصولة على التوازي مع مقاومة، فإن جزء من هذه الطاقة يتم تبديده من قبل هذه المقاومة على شكل حرارة، ولمعرفة نسبة هذه الطاقة المُبددة من قبل هذا العازل فإنها يتم اللجوء لإحتساب قيمة معامل التبديد والذي يُعطي ما يُسمى بمعدل التبديد أو الضياعات (Rate of loss).

و بالرجوع لتعريف اللجنة الكهروتقنية الدولية (IEC) لمعامل القدرة (PF) و التبديد (DF) على أنه نسبة القدرة المعالة (Active power) المُمتصة من قبل المادة العازلة إلى القدرة غير الفعالة (Reactive power) المُطلقة يُمكن كتابة المعادلات التالية:

$$DF = \text{Active Power (watt)} / \text{Reactive Power (var)} \quad (5.5)$$

$$= \frac{I_r}{I_c} = \frac{\cos(\theta)}{\sin(\theta)} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_p \cdot C_p} = \tan(\delta) \quad (5.6)$$

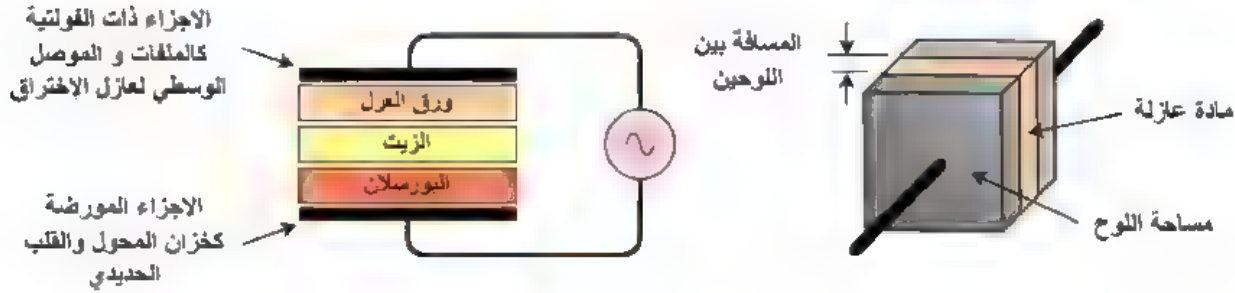
ملحوظة (5-1): تكون قيمة معامل التبديد (DF) النموذجية مساوية لقيمة معامل القدرة (PF) عندما تكون الزاوية (phi) الظاهرة في الشكل (5-3) قريبة من (90°) درجة، أي بصيغة أخرى إن قيمة معامل التبديد (DF) تكون مساوية لقيمة معامل القدرة (PF) عندما تكون قيمتهما أقل من (10%) بالمئة، أما فيما يخص القيم الأكبر من (10%) بالمئة فإنها يتم تصحيحها وفقاً للمنحنى الطاهر في الشكل (5-4) كما ورد في الكتيب التفصيلي لجهاز الفحص (DELTA2000) المُصنَّع بواسطة شركة (MEGGER).



الشكل رقم (5-4)

○ المواسعة (Capacitance)

تُعد المواسعة الكهربائية (Capacitance) مقياساً لقدرة الدائرة على تخزين الشحنة الكهربائية، فعند تطبيق جهد على مواسع (Capacitor) مكوّن من زوج من الصفائح الموصلة يفصل بينهما طبقة من مادة عازلة تُخَبِّر الإلكترونات على التوجه إلى أحد الألواح مما يؤدي إلى أن يُصبح هذا اللوح لديه فائض من الإلكترونات (اللوّح السالب) في حين أن اللوح الآخر يُصبح لديه نقص بالإلكترونات (اللوّح الموجب)، بحيث تكون هنالك سعة لكل لوح تحدد قدرته على الاحتفاظ بالإلكترونات وتعتمد على مساحة هذا اللوح.



الشكل رقم (5-5)

و تعتمد الشحنة الخاصة بالمواسع (Capacitor) على مقدار الفولتية المُطبقة عليه وكذلك سعة هذا المواسع كما هو مُبين بالمعادلة (5.7) التالية.

$$Q = C V \quad (5.7)$$

حيث:

Q : شحنة المواسع.

C : مقدار المواسعة.

V : الفولتية المُطبقة على المواسع.

و نتيجة لتغيّر قيمة الفولتية المُطبقة على طرفي المواسع نسبة للزمن، فإنه ينشأ تيار يمر خلال هذا المواسع كما هو مبين بالمعادلة (5.8).

$$I_c = C \frac{dV}{dT} \quad (5.8)$$

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (5.9)$$

حيث:

I_c : تيار المواسع.

C : مقدار المواسعة.

$\frac{dV}{dT}$: مقدار تغيّر الفولتية مع الزمن.

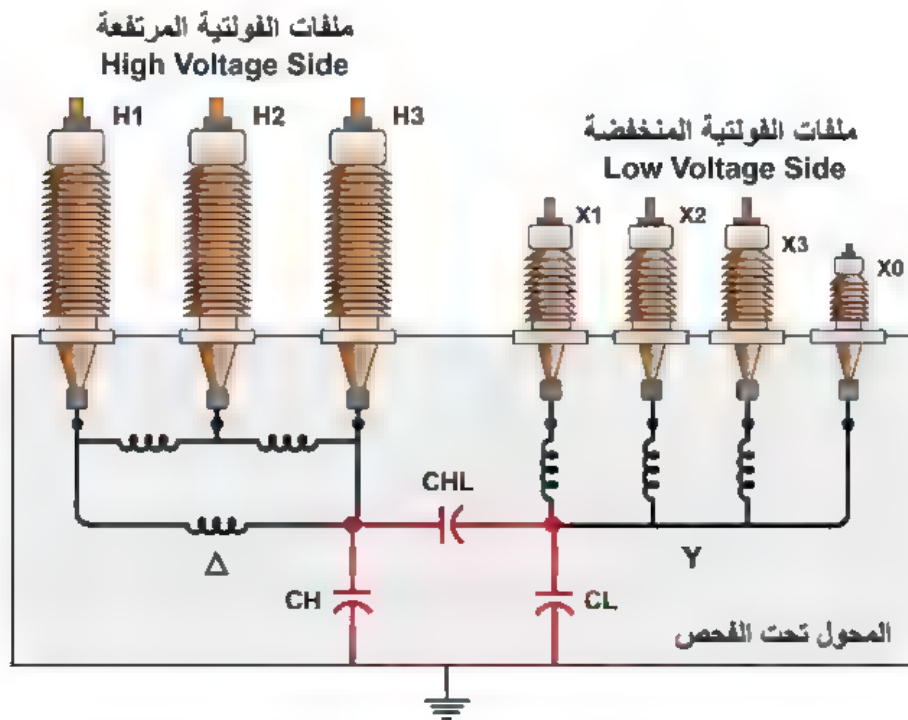
A : مساحة الألواح المكوّنة للمواسع.

d : المسافة الفاصلة بين الألواح المكوّنة للمواسع.

ومن المعادلات السابقة يظهر جلياً أن قيمة المواسعة الكهربائية تعتمد على الأمور التالية:

- ✓ المسافة بين اللوحين: بحيث تتناسب قيمة المواسعة وقيمة الشحنة المُتكوّنة بين الألواح تناسباً عكسياً مع مقدار المسافة بين لوحي المواسع.
- ✓ مساحة الألواح: بحيث تتناسب قيمة المواسعة وقيمة الشحنة المُتكوّنة بين الألواح تناسباً طردياً مع مقدار مساحة لوحي المواسع.
- ✓ نوع المادة العازلة بين الألواح.

مما سبق يُمكن ملاحظة أن قيمة المواسعة الكهربائية تتأثر بمجموعة من القيم الفيزيائية كمساحة لوح الموصل المكوّن لهذا المواسع (A) والمسافة الفاصلة بين هذه الألواح (d) بالإضافة لنوع المادة العازلة المُستخدمة (E)، وهذا بدوره جعل لهذه المواسعة أهمية كبرى في الكشف عن حالة المحول الداخلية عن طريق إعطاءها دلائل على حدوث تغيير فيزيائي في بُنية المحول الداخلية كتغيّر المسافة الفاصلة بين الملفات نتيجة لتعرضها لصدمة ميكانيكية أثناء نقل المحول أو تعرض المحول لتيارات عطل كبيرة وما ينتج عنها من قوى ميكانيكية أو أية قوى ميكانيكية أخرى قد يتعرض لها المحول أثناء نقله أو أثناء عمله الطبيعي.



ولزيادة الفهم فإنه يُمكن تمثيل نظام العزل داخل المحول وعوازل الإختراق بواسطة المواسعات حيث يُبين الشكل (5-6) ثلاث أقطاب رئيسية للمحول وهي ملفات الفولتية المرتفعة (HV) وملفات الفولتية المنخفضة (LV) وحزان المحول (الأرضي)، حيث تم تحديد هذه الأقطاب نتيجة لإختلاف فولتيتها عندما يكون المحول مُكهرب (Energized)، وذلك لأن المواسعة الكهربائية تنشأ بين سطحتين تختلفان بقيمة الفولتية مما أدى الى نشأة مُركّبات العازل الموضحة بالشكل (5-6) السابق (CH و CHL و CL) للمحولات ثلاثية الطور ثنائية الملفات كمثال، وتُعبّر هذه المواسعات عن الآتي:

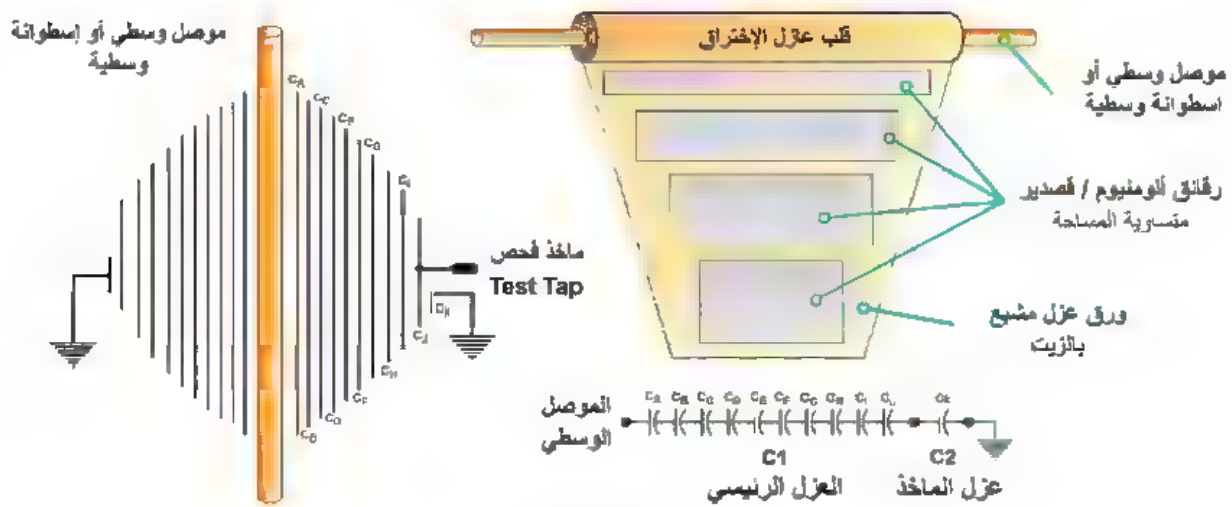
✓ تُعتبر المواسعة (CH) عن مُركبة العزل الخاصة بملفات الفولتية المرتفعة (HV Winding) والتي تأمن عزلاً كهربائياً بين ملفات الفولتية المرتفعة المكهربة و نقاط التأريض. وتشمل هذه المُركبة المواد العازلة الموجودة في عوازل إختراق الفولتية المرتفعة (HV Bushings) والمواد العازلة الخاصة بملفات الفولتية المرتفعة (HV Winding) نفسها وكذلك مواد العزل الأخرى الداخلة في تكوين المحول بالإضافة الى زيت المحول.

✓ و تُعتبر المواسعة (CHL) عن مُركبة العزل التي تأمن عزلاً كهربائياً بين ملفات الفولتية المرتفعة المكهربة (HV Winding) وملفات الفولتية المنخفضة المكهربة (LV Winding). وتشمل هذه المُركبة المواد العازلة الخاصة بملفات الفولتية المرتفعة والمنخفضة بالإضافة الى زيت المحول

✓ وتُعتبر المواسعة (CL) عن مُركبة العزل الخاصة بملفات الفولتية المنخفضة (LV Winding) والتي تأمن عزلاً كهربائياً بين ملفات الفولتية المنخفضة المكهربة ونقاط التأريض. وتشمل هذه المُركبة المواد العازلة الموجودة في عوازل الإختراق الفولتية المنخفضة (LV Bushings) والمواد العازلة الخاصة بملفات الفولتية المنخفضة (LV Winding) نفسها وكذلك مواد العزل الأخرى الداخلة في تكوين المحول بالإضافة الى زيت المحول.

يُمكن تطبيق هذا الفحص أيضاً على عوارل إختراق المحولات (Bushings) ذات العزل السعوي المُتدرج فقط (Capacitive-graded bushings) وفقاً لإعيار اللجنة الكهروتقنية الدولية [IEC, 60137-2017] بحيث يتم إجراء هذا الفحص لعازل الإختراق بشكل منفرد أي قبل تركيبه على المحول وبعد تركيبه كذلك

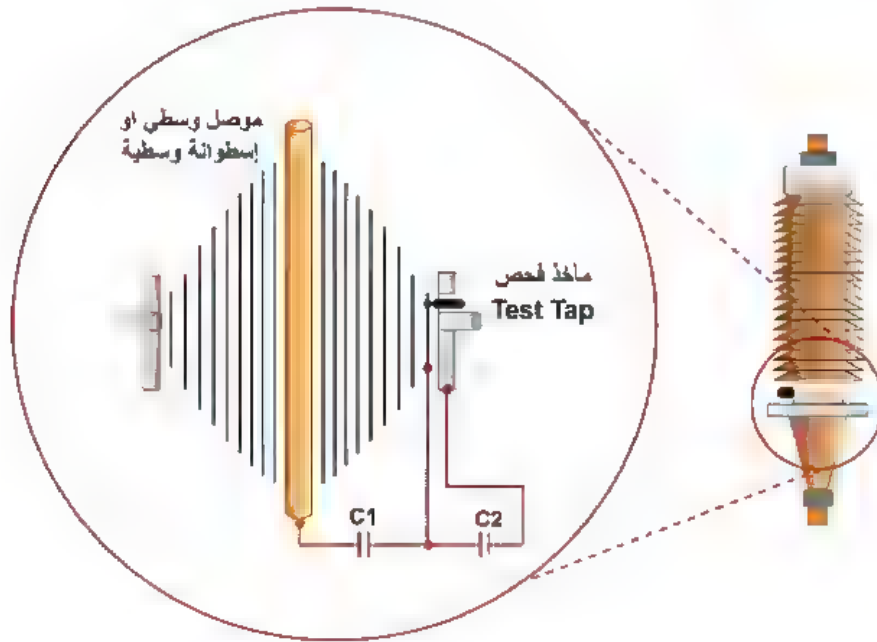
يتم تمثيل نظام العزل الخاص بعوارل الإختراق ذات العزل المُتدرج بواسطة مجموعة من المواسعات الموصولة على التوالي ذات قيمة متساوية وذلك لضمان توزيع متساوٍ للمجال الكهربائي الناتج عن الموصل الوسطي كما هو مُبين في الشكل (5-7).



الشكل رقم (5-7)

كما تم شرحه في الفصل الأول فإن هذا النوع من عوازل الإختراق (Bushings) ذو أنواع وأشكال مختلفة فمما يأتي بمأخذ فحص (Test Tap) كالمُبين بالشكل (5-7) والسابق والشكل (5-8) بحيث تنقسم مطبوعة العزل الداخلية لقسمين رئيسيين؛ القسم الأول وهو العزل الرئيسي لعازل الإختراق أي العزل بين الموصل أو الإسطوانة الوسطية لعازل الإختراق من جهة ومأخذ الفحص من جهة أخرى وعادة ما يتم

الإشارة له بالمواسعة (C1)، والقسم الثاني هو العزل بين مأخذ الفحص (Test Tap) و الأرض ويُشار له بالمواسعة (C2). لأغراض تشخيصية ولتحديد الأعطال في عوازل الإختراق (Bushings) عادة ما يتم الإعتماد على فحص مواسعة العزل الرئيسي (C1) أما عزل مأخذ الفحص (C2) فإنه لا يُستعاد منه لأسباب تشخيصية البتة، إلا أن بعض المراجع أوردت أنه من الممكن الإعتماد على قيمة معامل القدرة (PF) لمُركبة العزل هذه (C2) في الكشف عن تلوث الزيت الداخلي لعازل الإختراق.



الشكل رقم (5-8)

ملحوظة (5-2): عادة ما يكون الـ (Tap electrode) مؤرضاً في حال كانت المحول بالخدمة إلا في حالات تصميمية معينة.



- كيف يَدُل هذا الفحص على وجود أعطال في المحولات وعوازل الإختراق الخاصة بهذه المحولات (Transformer bushings):

في ثنايا شرح فلسفة الفحص تمت الإجابة عن هذا التساؤل بالكامل، حيث أن معامل التبديد ومعامل القدرة (DF و PF) ما هما إلى نُسب ناتجة عن قسمة القدرة الفعالة (الخصائر في حالتها هذه) على القدرة غير الفعالة أو الظاهرية (القدرة الكلية)، وهذا بدوره يوضح شكل جيّ أن هاذين المعاملين يدلان بشكل مباشر على كفاءة هذا العزل؛ فكلما رادت قيمة الخصائر (القدرة الفعالة) سيرداد المقدار الناتج عن قسمتها على القدرة الكلية (القدرة الظاهرية) وهذا المقدار الناتج هو معامل التبديد أو القدرة.

أما فيما يخص فحص المواسعة (Capacitance) فكما هو معلوم أن قيمة المواسعة تعتمد على بعض القيم الفيزيائية وأهمها المسافة الفاصلة بين الموصلات، بناءً على ذلك يُمكن إستنتاج أن المواسعة تصف

الحالة الفيزيائية الداخلية للمحول وفي حال تعرّض المحول لأي إجهاد ميكانيكي كبير كالسقوط أو الصدمات أو أية أضرار ميكانيكية أخرى كالتّي يتعرض لها في حال حدوث أعطال أرضية (Earth faults) أو أعطال قصر (Short circuit faults) فإن هذا كله سيؤدي لتعزّي في قيمة المواسعة المُقاسة والذي بدوره يدلنا على وجود هذا النوع من الأعطال في المحولات. ولكن عند الحديث عن فحص المواسعة لعوازل إختراق المحولات (Bushings) فإن الوضع يختلف قليلاً حيث أن نمط الأعطال (Failure mode) لعوارل الإختراق يختلف عن نظيره لملفات المحول، فكما هو طاهر في الشكل (5-7) السابق فإن مطومة العزل الداخلي الرئيسي لعازل الإختراق والمُشار إليه بالمواسعة (C1) يتكون من مجموعة من المواسعات متساوية المقدار والموصولة مع بعضها على التوالي مما يعني أنه في حال حدوث قصر (Short) لواحدة من هذه المواسعات (نمط العطل الأكثر شيوعاً لعوازل الإختراق) فإن قيمة المواسعة الكلية ستزداد كما هو موضح بالمثال التالي:

مثال: على فرض أن قيمة المواسعات الموصولة على التوالي (C_A إلى C_J) الظاهرة في الشكل (5-7) تساوي (700pF) بيكو فاراد لكل منها فإن المواسعة المُكافئة (C1) ستساوي:

$$\frac{1}{C1} = \frac{1}{C_A} + \frac{1}{C_B} + \frac{1}{C_C} + \frac{1}{C_D} + \frac{1}{C_E} + \frac{1}{C_F} + \frac{1}{C_G} + \frac{1}{C_H} + \frac{1}{C_I} + \frac{1}{C_J}$$

$$\frac{1}{C1} = \frac{1}{700} + \frac{1}{700} + \frac{1}{700} + \frac{1}{700} + \frac{1}{700} + \frac{1}{700} + \frac{1}{700} + \frac{1}{700} + \frac{1}{700} + \frac{1}{700}$$

$$C1 = \frac{700}{10} = 70 \text{ pF}$$

وفي حال حدوث عطل لأحد هذه المواسعات الموصولة على التوالي فرصاً المواسعة (C_G) حيث عادةً ما يكون نمط العطل (Failure mode) على شكل دائرة قصر (Short circuit) في غالب الأحيان كما تم ذكره مُسبقاً، فإن قيمة المواسعة المُكافئة (C1) ستزداد كالآتي:

$$\frac{1}{C1} = \frac{1}{C_A} + \frac{1}{C_B} + \frac{1}{C_C} + \frac{1}{C_D} + \frac{1}{C_E} + \frac{1}{C_F} + \frac{1}{\text{CG}} + \frac{1}{C_H} + \frac{1}{C_I} + \frac{1}{C_J}$$

$$C1 = \frac{700}{9} = 77.8 \text{ pF} \uparrow\uparrow$$

وهذا بدوره يُفسر كيف يدلنا هذا الفحص على وجود الأعطال في المحولات وعوازل الإختراق (Bushings)

4. طرق الفحص

يُمكن إجراء هذا الفحص بعدة طرق وذلك إما بواسطة القناطر كقنطرة شيرنج (Schering bridge) أو قنطرة (Transformer ratio arm Bridge) أو قنطرة تيتكس (Tettex bridge) أو بطريقة (Volt-Ampere-Watt method) أو ما يُسمى بفحص دوبل (Doble test) أو بواسطة أجهزة الفحص الإلكترونية الحديثة كتلك المُصنَّعة بواسطة شركة (MEGGER) أو غيرها من الشركات الرائدة في هذا المجال والتي تعتمد في آلية عملها على أحد القناطر سابقة الذكر:

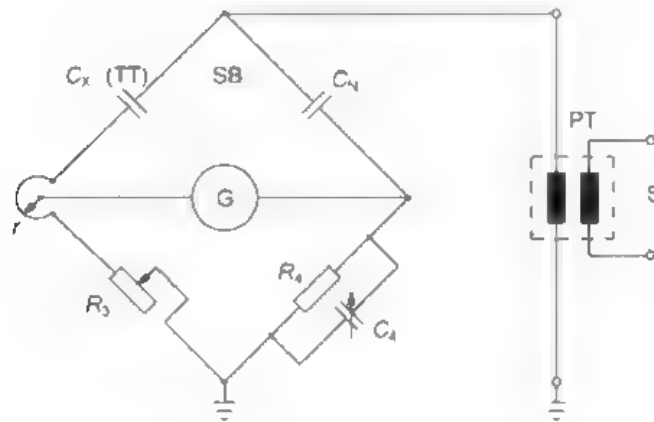
4.1 الفحص بواسطة القناطر (Bridges)

تعتمد هذه الطريقة في القياس على مقارنة مواسعة المحول تحت الفحص (C_X) بمواسعة معروفة مسبقاً (C_N أو C_S) أو ما يُسمى بالـ (Standard Capacitance).

• قنطرة شيرنج (Conventional Schering Bridge)

يُعد هذا النوع من القناطر من أقدم الوسائل المُستخدمة في قياس معامل التنديد/القدرة حيث تم تطويرها لأول مرة في أوائل القرن المنصرم (1900's)، حيث تتكون هذه القنطرة من الأجزاء التالية كما يظهر بالشكل (5-9) حسب [ABB, Testing of Power Transformers Edition1]:

- ✓ مواسعة غير معروفة (C_X) والتي تُمثل مواسعة المحول المُراد فحصه.
- ✓ مواسعة معلومة القيمة (C_N) ذات فولتية مرتفعة وضياعات عزل منخفضة وعادة ما تكون قيمتها من (100pF) بيكوفاراد إلى (10nF) نانوفاراد.
- ✓ مقاومة غير حثية ثابتة (R_4) بحيث تكون قيمتها قرابة الـ ($100/\pi$) أو ($1000/\pi$) أو ($10000/\pi$) أوم إلى آخره وذلك لتبسيط الحسابات الخاصة بهذه القنطرة.
- ✓ مقاومتين غير حثيتين متغيرتين (R_3) و (r).
- ✓ مواسعة مُتغيرة (C_4).
- ✓ جلفانوميتر (G).
- ✓ كوابل مَحوريّة (Coaxial cables) للتوصيل بين (C_X) و (C_N) وذلك للتقليل من تأثير التشويش الخارجي على قيمة الفحص.



الشكل رقم (5-9)

بعد الوصول لمرحلة الإتزان (Balance) لهذه القنطرة أي عدم مرور التيار في الجلفانوميتر نقوم بإحتساب قيمة معامل التبديد ($\tan \delta - DF$) وفقاً للمعادلة (5.11) التالية:

$$C_X = \frac{C_N \cdot R_4}{R_3 + r} \quad (5.10)$$

$$\tan \delta = C_4 \cdot \omega \cdot R_4 \quad (5.11)$$

حيث:

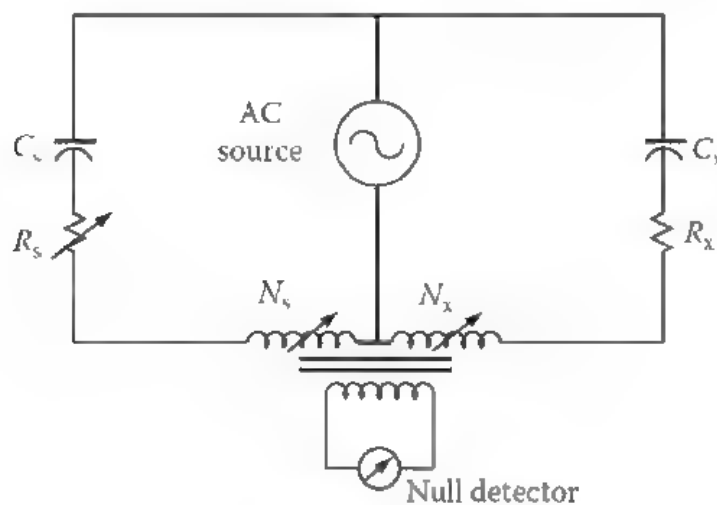
$$\omega = 2 \pi f \quad (5.12)$$

وفي حال إجراء القياسات عند (50 Hz) هيرتز وكانت قيمة ($R_4 = 1000/\pi$) وقيمة (C_4) بالنانوفارد فإن قيمة معامل التبديد/القدرة (DF/PF) يُمكن إحسابها بإستخدام المعادلة (5.13) التالية:

$$\tan \delta = 2 \pi 50 \cdot C_4 \cdot \frac{100}{\pi} \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-2} = 0.01 C_4 [\%] \quad (5.13)$$

• قنطرة (Transformer ratio arm bridge)

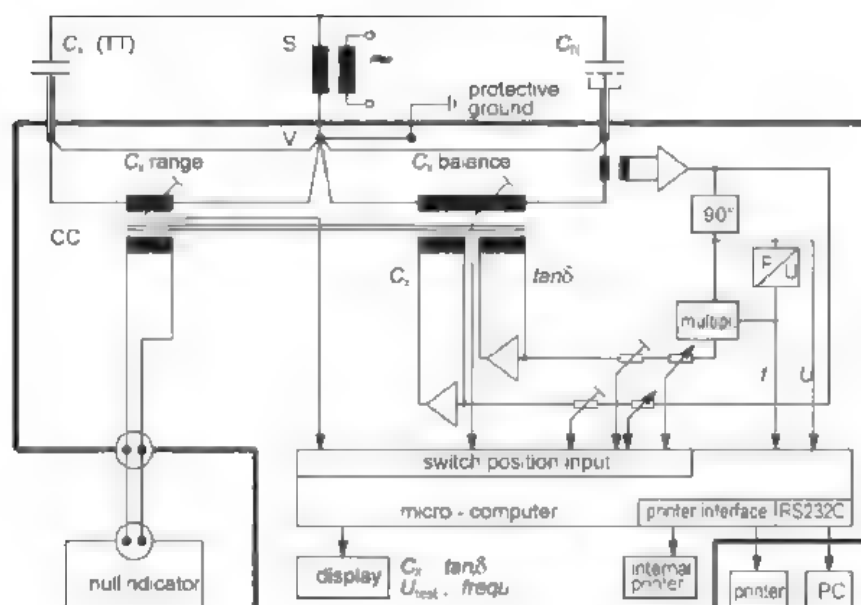
في هذه القنطرة يتم تطبيق الفولتية نفسها على المواسعة المرجعية (C_S) و المواسعة المُراد قياسها (C_X) ومن ثم يتم موازنة تيار المواسعة المرجعية وتيار المواسعة المُراد قياسها عن طريق تغيير عدد لفات أذرع محول التيار التفاضلي (N_S و N_X)، وكذلك يتم موازنة التيار المادي المار بالمقاومة المُراد قياسها (R_X) مع التيار المادي المار بالمقاومة المُتغيرة (R_S) عبر تغيير قيمة هذه المقاومة المُتغيرة، وبعد الوصول لحالة الإتزان يتم إحساب قيمة المواسعة (C_X) و المقاومة (R_X) ومنه يتم إحساب قيمة معامل التبديد/القدرة. الشكل (5-10) الوارد بالمرجع [Paul Gill, Electrical Power Equipment Maintenance and Testing] يبين إستخدام هذه القنطرة في أجهزة الفحص المُصنعة بواسطة شركة (MEGGER) العالمية للطراز (DELTA2000) و (DELTA3000).



الشكل رقم (5-10)

- قنطرة حساب معامل التبديد بإضافة مقارن تيار ومعالجات دقيقة (DF bridge with) (current comparator and microprocessor

في هذه القنطرة يتم إحتساب معامل التبديد/القدرة بنفس مبدأ العمل الحاص بقنطرة شيرنج (Schering Bridge)، حيث أن التيار يتم عمل إتزان له في المُقارن (Comparator) بحقن تيار لموازنة الضياعات كما يظهر في الدائرة الخاصة بهذه القنطرة في الشكل (5-11) من نوع (TETTEX 2809) حسب (ABB, Testing of Power Transformers Edition1]

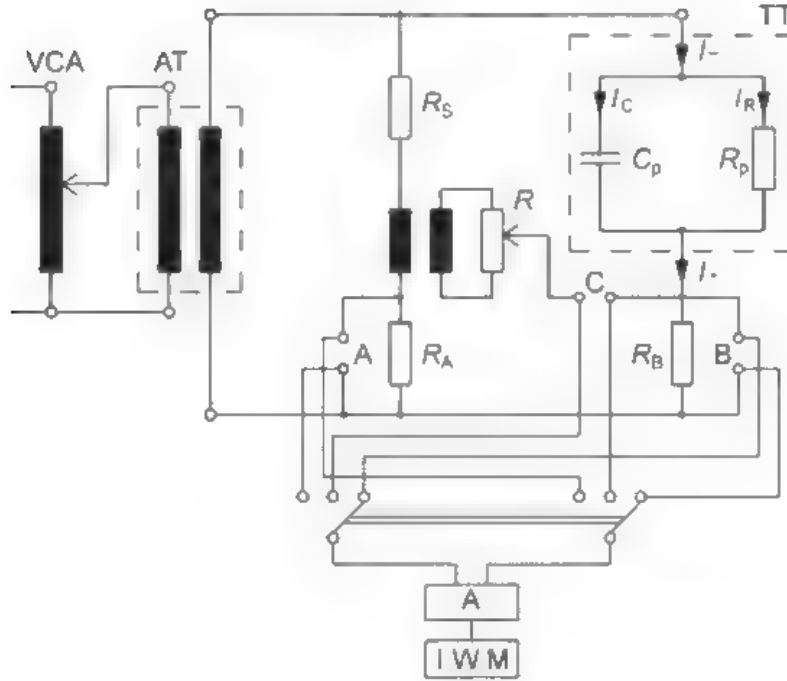


الشكل رقم (5-11)

4.2 فحص دوبل أو ما يُسمى بطريقة الفولت – أمبير - واط (-Volt) Doble test (ampere-watt method"

يعتمد هذا الفحص على قياس تيار الشحن المتردد وكذلك ضياعات المادة العازلة بالإضافة لمواسعة المادة العازلة للمحول تحت الفحص، بحيث يتم إحتساب معامل التبديد/القدرة بالإعتماد على قيمة التيار والضياعات سابقة الذكر.

الشكل (5-12) يُبين دائرة فحص دوبل (Doble test) مُبسّطة حسب [ABB, Testing of Power Transformers Edition1]



الشكل رقم (5-12)

ملحوظة (5-3): عند فحص عوازل إختراق المحولات (Bushings) باستخدام القناطر يُنصح باستخدام القطرة من نوع (Transformer-ratio arm type)



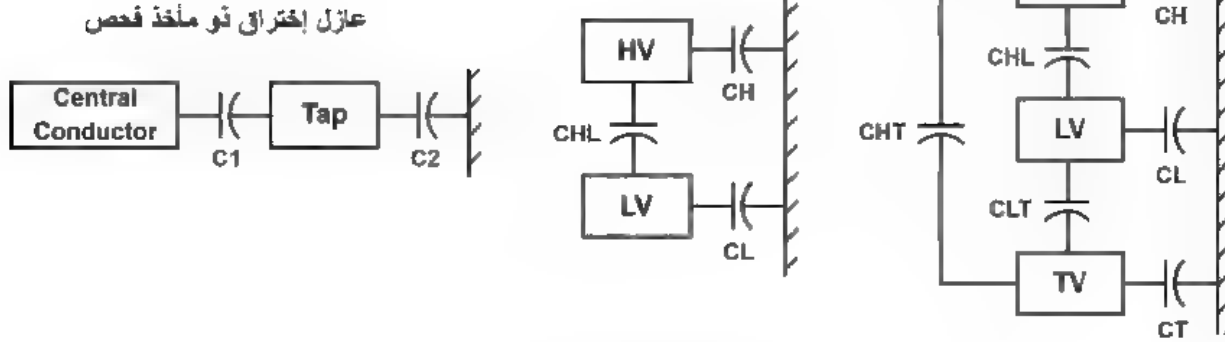
4.3 الفحص باستخدام أجهزة الفحص الحديثة؛ مثل جهاز (DELTA 2000 by MEGGER) كما سيتم شرحه بالملحق رقم (5-1).

5. أساليب الفحص

تعد المحولات وعوازل الإختراق من المُعدات التي تحتوي على منظومة عزل مُركبة فكما هو مُبين بالشكل (5-13) للمحولات ثلاثية الطور ثنائية وثلاثية الملفات فإن منظومة العزل تتكون من العزل بين الملفات المختلفة وبين الملفات والأرض، أما عوازل الإختراق (Bushings) ذات العزل المتدرج (Graded insulation bushings) فإن منظومة العزل الخاصة بها تتكون عادةً من العزل الرئيسي والذي يكون بين الموصل الوسطي ومأخذ الفحص (Test tap) و العزل الثانوي أو عزل المأخذ والذي يكون بين مأخذ الفحص والأرضي وذلك لعوازل الإختراق ذات مأخذ الفحص (Test tap).

محول ثلاثي الأطوار ثلاثي الملفات

محول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات

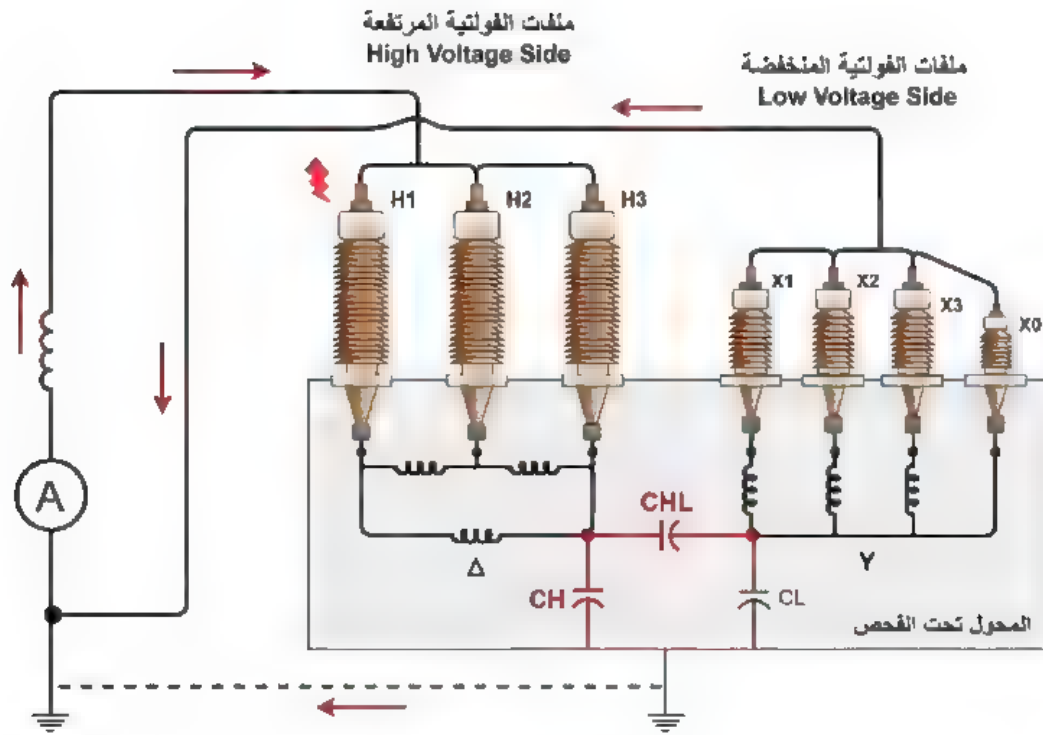


الشكل رقم (5-13)

مما سبق ونظراً لتعقيد نظام العزل للمحولات وعوازل إحتراق هذه المحولات، وَجِبَ إختيار الأسلوب المناسب للفحص وفقاً لنوع مُركبة العزل المُراد فحصها فيما إذا كانت بين الملفات أو بين الملفات والأرضي أو غيرها من مُركبات العزل. حيث تتلخص هذه الأساليب بثلاثة رئيسية كالآتي:

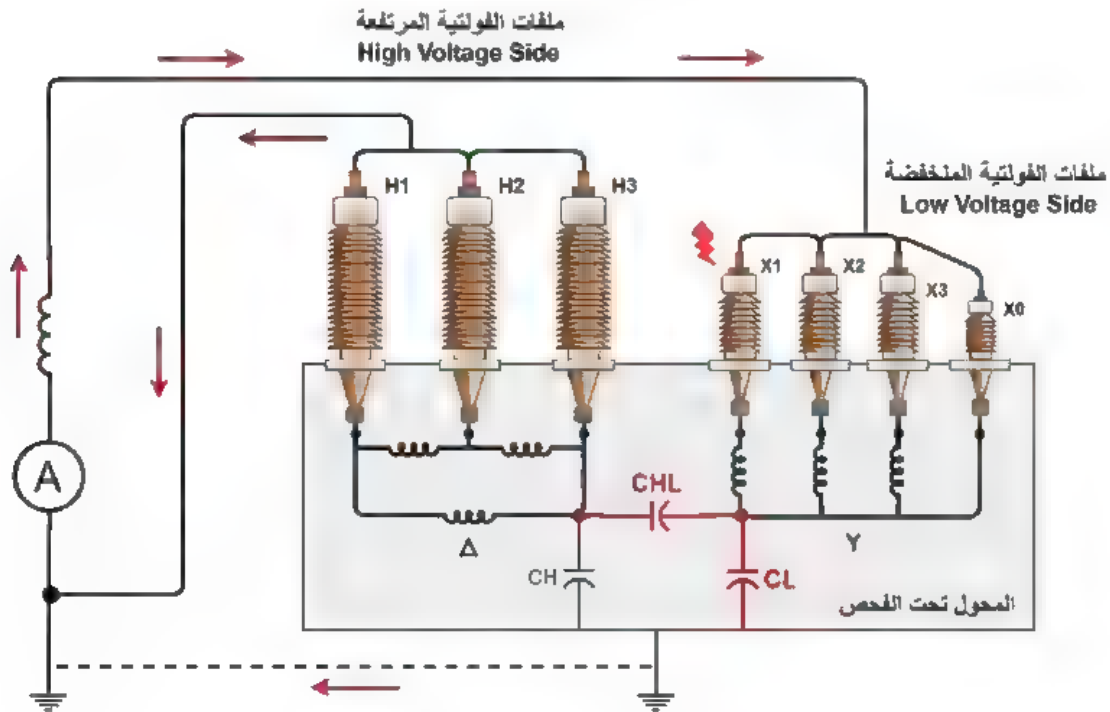
5.1 عينة فحص مؤرضة - Grounded Specimen Test (GST)

عادة ما يتم إستخدام هذه الأسلوب للمحولات عند فحص العزل بين الملفات المختلفة (HV و LV و TV) مُضافاً إليه عزل أحد هذه الملفات مع الأرضي كما هو مبين بالشكل (5-14) الذي يوضح توصيلة الأسلوب (GST) المُتبّع لفحص العزل بين ملفات الفولتية المرتفعة والمنخفضة من جهة مصافاً إليها عزل ملفات الفولتية المرتفعة مع الأرض (CHL + CH) من جهة أخرى لمحول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات، بحيث يتم تطبيق الفولتية على ملفات الفولتية المرتفعة للمحول وقراءة التيار التسريبي عبر ملفات الفولتية المنخفضة وكذلك الأرضي.

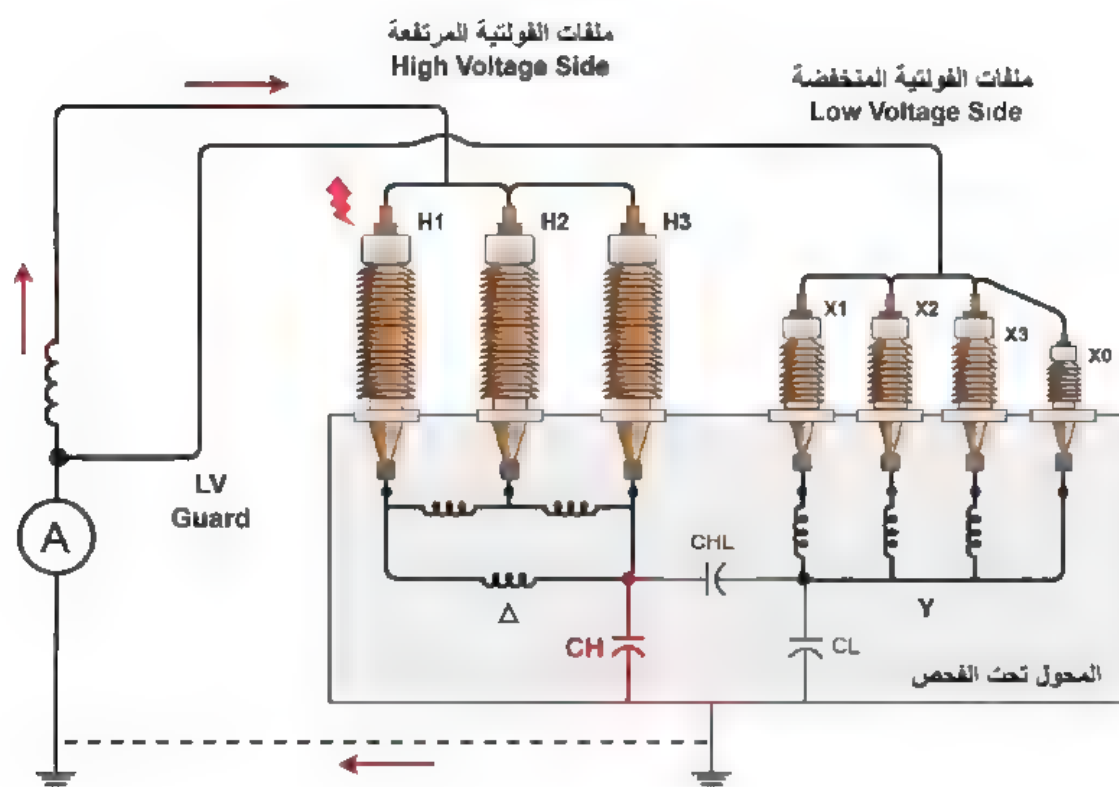


الشكل رقم (5-14)

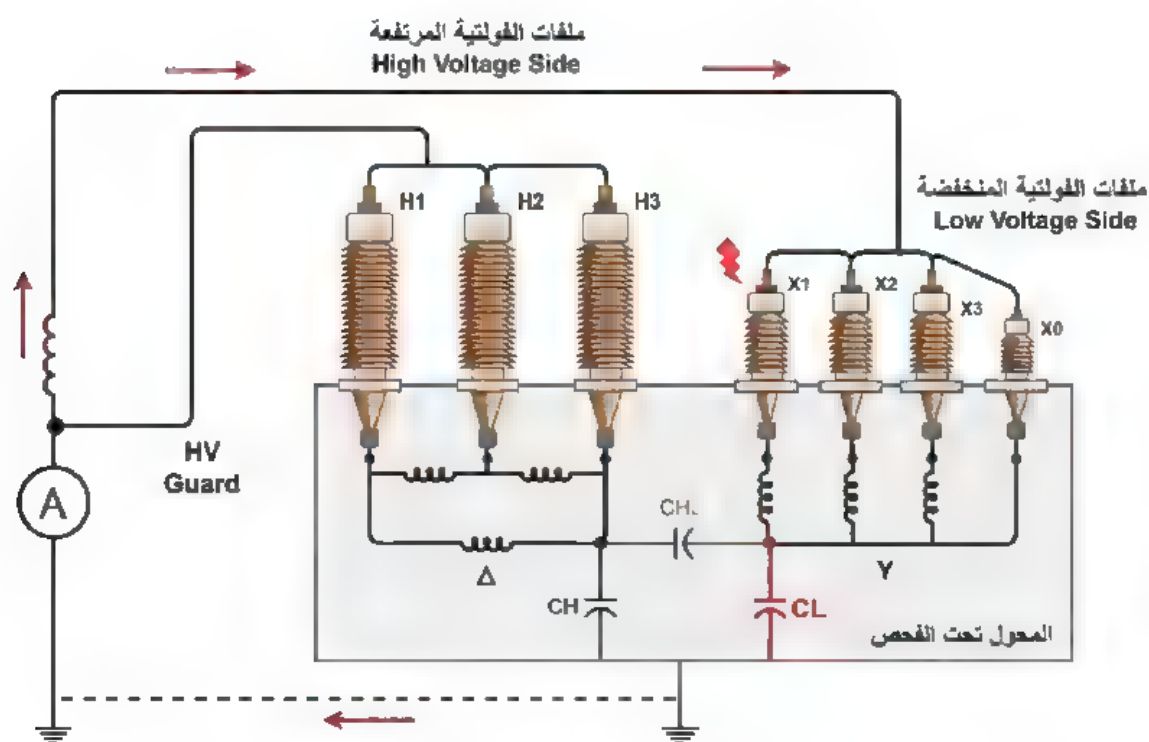
الشكل (5-15) يوضح توصيلة أسلوب العينة المؤرضة (GST) المتبع لفحص العزل بين ملفات الفولتية المرتفعة والمنخفضة من جهة مضافاً إليها عزل ملفات الفولتية المنخفضة مع الأرض ($CHL + CL$) من جهة أخرى لمحول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات، بحيث يتم تطبيق الفولتية على ملفات الفولتية المنخفضة للمحول وقراءة التيار التسريبي عبر ملفات الفولتية المرتفعة وكذلك الأرضي.



الشكل رقم (5-15)



الشكل رقم (5-17)



الشكل رقم (5-18)

ويُمكن تلخيص توصيلات هذه الأساليب من خلال الجداول التالية وفقاً لنوع المحول فيما إذا كان ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات أو ثلاثي الملفات بالإضافة لعوازل إختراق المحولات (Bushings).

• محول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (three phase two windings transformer)

الجدول (5-1) يُبين التوصيلة المناسبة لكل أسلوب من أساليب الفحص مع ذكر القيمة المُقاسة عند إستخدام هذا الأسلوب للمحولات ثلاثية الطور ثنائية الملفات (Three phase two winding transformers).

الجدول رقم (5-1)

الفحص	أطراف المحول المشحونة	GST-Ground	GST-Guard	UST	القيمة المُقاسة
1	HV	LV	-	-	CH + CHL
2	HV	-	LV	-	CH
3	HV	-	-	LV	CHL
4	LV	HV	-	-	CL + CHL
5	LV	-	HV	-	CL
6	LV	-	-	HV	CHL

يُمكن إجراء الفحص رقم (2 و 3 و 5) وذلك لإستخراج القيم التالية (CH و CHL و CL)، كما ويُمكن إجراء الفحوصات (1 و 4) وذلك لإستخراج القيم (CH + CHL) و (CL + CHL) والتأكد من القيمة المُقاسة مسبقاً وذلك كالآتي:

$$Test2 = Test1 - Test3 \quad (5.14)$$

$$Test5 = Test4 - Test6 \quad (5.15)$$

• محول ثلاثي الأطوار ثلاثي الملفات (three phase tertiary windings transformer)

الجدول (5-2) يُبين التوصيلة المناسبة لكل أسلوب من أساليب الفحص مع ذكر القيمة المُقاسة عند إستخدام هذا الأسلوب للمحولات ثلاثية الطور ثلاثية الملفات (Three phase tertiary winding transformers).

الجدول رقم (2-5)

الفحص	أطراف المحول المشحونة	GST-Ground	GST-Guard	UST	القيمة المُقاسة
1	HV	LV	TV	-	CH + CHL
2	HV	-	LV/TV	-	CH
3	HV	-	-	LV	CHL
4	LV	TV	HV	-	CL + CLT
5	LV	-	HV/TV	-	CL
6	LV	HV	-	TV	CLT
7	TV	HV	LV	-	CT + CHT
8	TV	-	HV/LV	-	CT
9	TV	LV	-	HV	CHT

يُمكن إجراء الفحص رقم (2 و 3 و 5 و 6 و 8 و 9) وذلك لإستخراج القيم التالية (CH و CHL و CL و CLT و CT و CHT)، كما ويُمكن إجراء الفحوصات (1 و 4 و 7) وذلك لإستخراج القيم (CH + CHL) و (CL + CLT) و (CT + CHT) والتأكد من القيمة المُقاسة مسبقاً وذلك كالآتي:

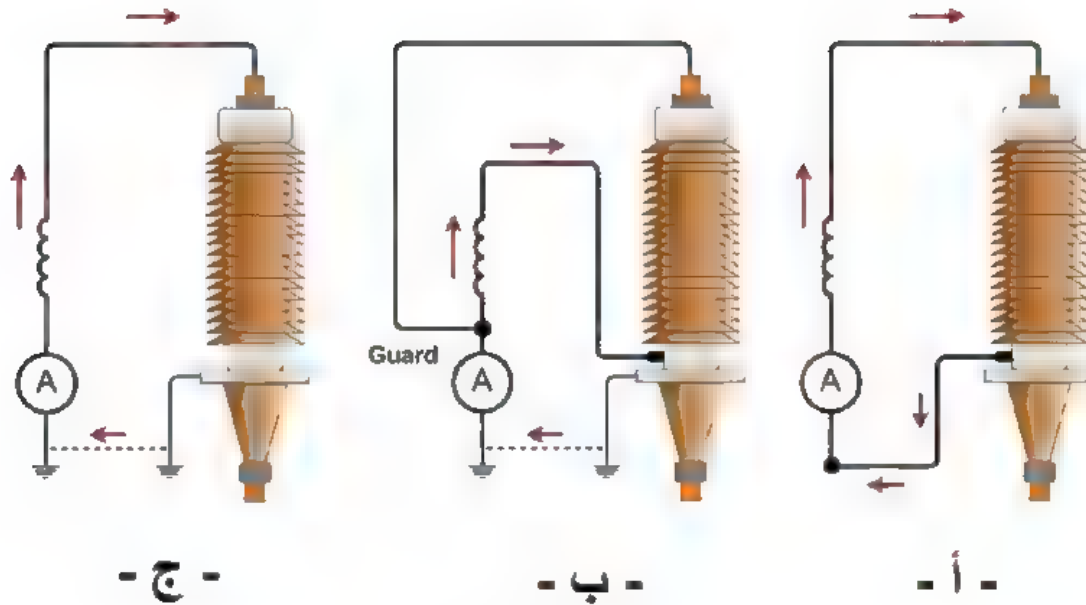
$$Test3 = Test1 - Test2 \quad (5.16)$$

$$Test6 = Test4 - Test5 \quad (5.17)$$

$$Test9 = Test7 - Test8 \quad (5.18)$$

• عوازل الإختراق (Bushings)

أما فيما يخص عوازل إختراق المولتية المرتفعة من النوع دو العزل المُتدرج (Capacitive graded bushing OIP or RIP) فإنه عادةً ما يتم استخدام أسلوب فحص العينة غير المؤرضة (UST) وتكون التوصيلة كما هو مبين بالشكل [(5-19) (أ)]، حيث أن هذه التوصيلة تهدف للكشف عن المواسعة (C1) والتي تُمثل مواسعة العزل الرئيسي (وهي المواسعة بين مأخذ الفحص (Test tap) و المُوصل (Conductor) أو الإسطوانة الوسطية (Central condenser)) الموضحة بالشكل (5-8)، وهو غالباً ما يتم فحصه لهذا النوع من عوازل الإختراق بشكل روتيني أو لأسباب تشخيصية. أما المواسعة (C2) والتي تمثل المواسعة بين مأخذ الفحص (Test tap) والأرضي أو قاعدة التثبيت (Bushing flange) تحتاج لتوصيلة أخرى كما هو مبين في الشكل [(5-19) (ب)] وعادة لا يتم إستخراج هذه القيمة لأسباب تشخيصية.



الشكل رقم (5-19)

وفي حال كان عازل الإختراق من النوع الصلب أو ذات العزل غير المُتدرج (Solid / Ungraded Bushings) فإن الفحص يتم عادة باستخدام أسلوب (GST) نظراً لعدم وجود مأخذ فحص (Test tap)، بحيث يتم الفحص بين المُوصل (Conductor) وحافة عازل الإختراق أو كما تُسمى بقاعدة تثبيت عازل الإختراق (Bushing Flange). كما وتُجدر الإشارة إلى أن إجراء هذا الفحص على هذه الأنواع من عوازل الإختراق (Bushings) غير موصى به وذلك لعدم إعطائه معلومات تفيد في تشخيص حالة العزل لعازل الإختراق.

الجدول (5-3) التالي يُبين التوصيلة المناسبة لكل أسلوب من أساليب الفحص مع ذكر القيمة المُقاسة عند استخدام هذا الأسلوب لعوازل إختراق المحولات (Bushings).

الجدول رقم (5-3)

الفحص	أطراف المحول المشحونة	Ground	Guard	UST	القيمة المُقاسة	ملاحظات
1	Conductor	-	-	Tap	C1	*
2	Tap	Conductor	-	-	C1 + C2	**
3	Tap	-	Conductor	-	C2	**
4	Tap	-	-	Conductor	C1	**
5	Conductor	Flange	-	-	Whole Bushing	*

* عادة ما تكون فولتية الفحص (10kV) كيلو فولت.

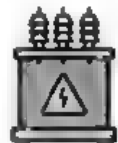
** عند الفحص بهذه الأساليب عادة ما تكون قيمة الفولتية مخفضة مقارنة بالأساليب الأخرى، يُرجى الإطلاع على الملحق (5-2) لبعض قيم الفولتيات المُقترحة.

يُنصح عادة بتطبيق الفحص رقم (1) وفي حال كانت نتيجة الفحص غير مرضية يُمكن تطبيق الفحص رقم (2)، كما ويُمكن إجراء الفحوصات (3 و 4) في حال كانت نتيجة الفحوصات (1 و 2) غير مرضية وتُدل على وجود عطل بحيث يتم مقارنة نتيجة الفحص رقم (4) بالفحص رقم (1). وفي حال كانت عازل الإحتراق (Bushing) غير موصول بالمحول (Unmounted) يُنصح بإجراء الفحوصات (1 و 2 و 5) معاً.

ملحوظة (4-5): عند إجراء هذه الفحص لعوازل الإحتراق (Bushings) غير الموصولة بالمحول (Unmounted) كتلك الموحدة في المستودعات كقطع غيار فإنه يُنصح بوضع عازل الإحتراق على دعامة من مادة موصلة مؤرضة وتجنب تركها في صندوقها الخشبي أو فوق دعامات خشبية لتجنب التأثير على نتيجة الفحص وإحتساب الخشب من ضمن مادة العزل المفحوصة.



ملحوظة (5-5): فيما يخص عوارل الإحتراق (Bushings) فإنه يُنصح بإجراء فحص يُسمى (Hot collar test) في حال كان عازل الإحتراق لا يحتوي على مأخذ فحص (Test Tap) أو في حال ظهور نتائج غير مرضية لفحص (C1) و (C2) بالطريقة الإعتيادية سابقة الذكر بالإضافة للتأكد من وجود زيت داخل عازل الإحتراق في حال كانت بلا مؤشر أو بمؤشر معطل.



6. خطوات الفحص

بعد التعرّف على فلسفة الفحص وطرق وأساليب إجرائه والتوصيلات اللازمة لذلك، يُمكن البدء بخطوات الفحص كالآتي:

- 6.1 عزل المحول كهربائياً (Transformer De-energization) مع مراعاة تطبيق نظام (إقفال مصادر الطاقة ووضع لافتات عليها) أو ما يُسمى بنظام التقافل (Lock-out Tag-out LOTO).
- 6.2 عزل نظام مكافحة الحريق بالماء (أو كما يُسمى نظام تبريد خزان المحول ومنع إنتشار الحريق) الخاص بالمحول الفراد فحوصه خشية عمل النظام بشكل خاطئ أثناء إجراء الفحص مما قد يؤدي لمخاطر القوس الكهربائي وما ينطوي عليه من مخاطر على الأشخاص أو المحول خاصة أثناء تطبيق الفولتية على المحول أو قد يؤدي الماء لتلف جهاز الفحص نفسه.
- 6.3 تطبيق كافة إجراءات السلامة الخاصة بإجراء الفحوصات الكهربائية المُضمنة في معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Recommended Practices for Safety in High-Voltage and High-Power Testing] و المعهد الوطني الأمريكي للمعايير [ANSI National Electrical Safety Code] و مُنظمة إدارة السلامة والصحة المهنية [OSHA Specifications for Accident Prevention Signs and Tags].

6.4 فتح أطراف الفولتية المنخفضة (LV side terminals) والفولتية المرتفعة (HV side terminals) وذلك بإزالة الموصلات عنها (Removing HV&LV Cables or Busbars) وكذلك الحال بنقطة التعادل (Neutral point) للمحول إن وجدت.

6.5 تفريغ الشحنات المُخزنة بملفات المحول (Trapped Charges) قبل توصيل كوابل الفحص وذلك بعمل دائرة قصر للملفات (Short circuit) وتأريضها لمدة من الزمن وكذلك الحال بعد الإنتهاء من الفحص وقبل إزالة كوابل الفحص. بالإضافة إلى التأكد من تأريض حزان المحول أثناء إجراء الفحص.

تحذير: يكون تأريض كوابل الفولتية المرتفعة إما عبر مُستعزلات التأريض الثابتة (Earthing Dis-connector) أو المتنقلة (Portable) قبل البدء بفك هذه الكوابل عن عوازل إختراق المحولات (Bushings)، وذلك لما قد تحويه من فولتية حثية (Induction voltage) ناتجة عن المُعدات أو الحطوط الهوائية (Overhead Lines - OHL) المجاورة للمحول المُراد فحصه والمشحونة بفولتيات مرتفعة.



6.6 تنظيف العازل الخارجي لعوازل إختراق المحول (Bushings) أمر لا غنى عنه لتجنب التأثير على قيمة المحص، بالإضافة إلى التفقد البصري (الظاهري) للعزل الخارجي لعازل الإختراق فيما إذا كان هنالك أية ضرر ميكانيكي كالكسر أو الشقوق لحق بهذا العازل أو أي أوضاع غير طبيعية أخرى.

ملحوظة (5-6): عند إجراء هذا الفحص بشكل روتيني فإنه يُنصح بوضع مُعيّر الخطوة (Tap changer) على الخطوة الأعلى (Higher tap) أو الأقل (Lower tap).



6.7 تسجيل درجة حرارة المُعدّة المُراد فحصها وذلك بتسجيل: ✓ درجة حرارة الزيت العلوي (Top oil Temperature) للمحولات المغمورة بالزيت. وفي حال تعذّر أخذ هذه القيمة لسبب ما كتعطل المؤشر الخاص بهذه القراءة، يُمكن إحتساب هذه القيمة عن طريق أخذ درجة حرارة خزان المحول (منطقة قريبة من حساس درجة حرارة الزيت العلوي) من خلال ميزان حرارة مُلاصق لجدار الخزان مضافاً إليها ثلثي الفرق بين درجة حرارة الخزان وحرارة الهواء المحيط بالمحول في الطل [Doble Test Procedure, 72A-2244 Rev.A].

مثال: إذا كانت درجة حرارة الخزان من الخارج تساوي (27°) درجة مئوية وكانت درجة حرارة الهواء المحيط بالمحول قرابة (21°) درجة مئوية فإن قيمة درجة حرارة الزيت العلوي المُحتسبة تساوي:

$$Top\ oil\ temp. = Wall\ temp. + \frac{2}{3} \text{ of } (Wall\ tem. - Air\ temp.) \quad (5.19)$$

$$Top\ oil\ temp. = 27 + \left(\frac{2}{3}\right) \cdot (27 - 21) = 31^{\circ}C$$

✓ القيمة المتوسطة بين درجة حرارة الجو المحيط (Ambient temperature) وحرارة الزيت العلوي للمحول عند فحص عوازل إختراق المحولات (Bushings) ذات النوع (Air to oil Bushings) في حال كانت مُتصلة بالمحول.

✓ درجة حرارة الجو المحيط (Ambient temperature) لعوازل إختراق المحول (Bushings) غير المُتصلة بالمحول أي قبل تركيبها على المحول كتلك الموجودة ضمن قطع العيار في المستودعات.

ملحوظة (5-7): بالرجوع للمعيار الصادر عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE, C57.12.90-2015] فإنه عند إجراء الفحص يجب أن تكون درجة الحرارة المتوسطة للملفات والريت محصورة بين ($10^{\circ} - 40^{\circ}$) درجة مئوية و يُفضّل أن تكون قريبة من درجة الحرارة (20°) درجة مئوية.



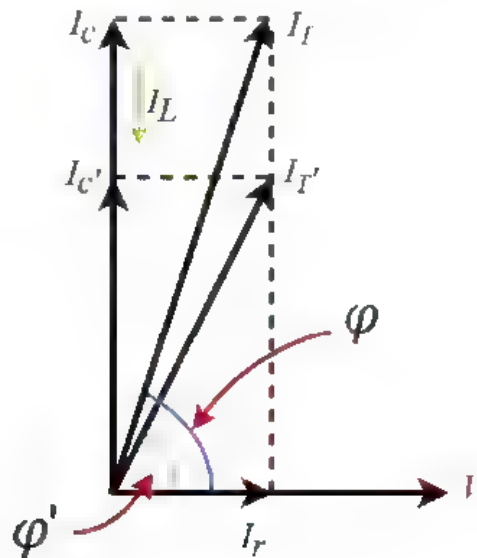
ملحوظة (5-8): يجب تجنب إجراء هذا الفحص عند درجة حرارة أقل من درجة التجمد وذلك لأن هذا الفحص يهدف إلى معرفة مدى رطوبة المادة العازلة وكما هو معلوم فإن خصائص الماء تختلف عند التجمد مما يجعل معرفة نسبتها في العزل صعبة القياس.



ملحوظة (5-9): عند فحص عوازل إختراق المحولات (Bushings) من النوع (OIP) فإنه يُنصح بأن تكون درجة الحرارة أثناء الفحص مرتفعة حيث أن بعض التجارب أثبتت أنه مع إرتفاع درجة الحرارة تزداد حساسية الفحص إتجاه كمية الرطوبة في المادة العازلة كما ورد في الكتيب التفصيلي [ABB, Bushing diagnostics and conditioning, 2750 515-142 en, Rev.1].



6.8 قصر أطراف ملفات الفولتية المرتفعة (HV terminals short circuit) وكذلك أطراف ملفات الفولتية المنخفضة (LV terminals short circuit)، حيث أنه في حالة عدم قصر الملفات ينشأ تيار حثي (I_L) والذي بدوره يقوم بإلغاء جزء من التيار السعوي (I_C) كما هو مبين بالرسم المُتجهي الموضح في الشكل (5-20).



الشكل رقم (5-20)

من الشكل السابق يُمكن ملاحظة العلاقة الطردية بين قيمة التيار السعوي (I_C) وقيمة الراوية (φ) التي تقلّ كما قلّ هذا التيار السعوي نتيجة لظهور مركبة التيار الحثي (I_L) سابقة الذكر مما يؤدي بالمُحصلة لزيادة قيمة معامل التبديد/القدرة المُقاسة.

$$I'_C < I_C$$

$$\varphi' < \varphi$$

$$\cos(\varphi') > \cos(\varphi)$$

عند قَصْر (Short circuit) أطراف الفولتية المرتفعة مع بعضها وكذلك أطراف الفولتية المنخفضة يجب مراعاة أن تكون الأسلاك المُستخدمة لعمل دائرة القَصْر (Short circuit) أقصر ما يُمكن وغير مُلامسة لأي أجسام مؤرضة كجسم المحول أو أي نقاط تأريض أخرى، وأيضاً يجب التأكد من ربط هذه الأسلاك لإبعادها عن الأجسام المؤرضة برباط من مادة عازلة وكذلك التأكد من جفاف ونظافة هذا الرباط.

6.9 عمل التوصيلة الخاصة بهذا الفحص كما هو موضح في المُلحقات وفقاً لنوع الجهاز المُستخدم في الفحص وذلك بعد التأكد من تنظيف أطراف المحول التي سيتم التوصيل عليها حتى لا تؤثر على قيمة الفحص كما هو مبين بالمُلحق رقم (5-1) عند استخدام جهاز الفحص (DELTA by MEGGER).

ملحوظة (5-10): يجب أن تكون ملفات المحول مغمورة بالزيت عند إجراء الفحص، أي أن لا يكون المحول مُفرغ من الزيت بالإضافة إلى أن تكون عوارل إختراق المحول (Bushings) موصولة بالمحول.



6.10 تحديد فولتية الفحص :

يُعتبر فحص معامل التبديد/القدرة وفحص المواسعة من الفحوصات غير التدميرية للعزل، لذلك يجب تطبيق فولتية كهربائية أقل من الفولتية الإسمية للمُعَدّة والجدول (5-4) التالي يوضح الفولتية المقترحة الواجب تطبيقها خلال هذا الفحص كما ورد في [Jill C. Duplessis, Electric Field Tests for the Life Management of Transformers].

الجدول رقم (5-4)

فولتية ملفات المحول بالكيلوفولت (kV)	فولتية الفحص المقترحة بالكيلوفولت (kV)
أكبر من 12	10
أكبر من 5 وأقل أو تساوي 12	5
أكبر من 2.4 وأقل من أو تساوي 5	2
أقل من أو تساوي 2.4	1

وفيما يُخصّ محولات التوزيع ذات الملفات الموصولة على شكل نجمة (Y - Star) ذات نقطة تعادل مؤرضة يُنصح بعدم تطبيق فولتية فحص أكبر من (2kV) كيلوفولت.

ولأسباب تشخيصية فإنه عند إجراء هذا الفحص على مُعدّات يُشتبه تعرّضها للتلف كالمحولات التي تتعرض للفصل القسري (Trip) نتيجة لتفعل مرحلات الحماية بالإضافة للمحولات المُحزنة لفترات طويلة ويشته في تعرّضها لرطوبة عالية، فإنه يُنصح بتطبيق فولتية مُتدنية نسبياً قرابة الـ (2kV) كيلوفولت وفي حال نجاح الفحص يُمكن التصاعد في مقدار الفولتية حتى الوصول لفولتية الفحص المناسبة.

وفي هذا الباب الحديث بطول ويطول لذلك فإن أغلب أجهزة الفحص الحديثة تُتيح إجراء هذا الفحص باستخدام فولتيات مختلفة وتقوم بتصحيح القيمة المُقاسة لـ (10kV) كيلوفولت و (25kV) كيلوفولت لينسنى مقارنتها بنتائج الفحوصات المصنعية والموقعية السابقة لهذا المحول. وللإستزادة في هذا الباب يُمكن إيجاد الجداول المُضمّنة بالملحق رقم (2-5) لبعض قيم فولتيات الفحص المقترحة لعوازل الإختراق المختلفة وفقاً لمستوى فولتيتها ونوع عازل الإختراق بالرجوع لأشهر المراجع والمعايير العالمية.

6.11 تحديد أسلوب الفحص وفقاً لنوع المُعدّة المُراد فحصها فيما إذا كانت عازل إختراق (Bushing) أو محول ثلاثي الطور ثنائي أو ثلاثي الملفات وذلك بالرجوع إلى فقرة أساليب الفحص.

6.12 بعد تحديد فولتية الفحص و إختيار أسلوب الفحص المناسب وفقاً لنوع المُعدّة المُراد فحصها يتم البدء بالفحص وفقاً للخطوات المبينة في الملحق رقم (1-5) الخاص بجهاز الفحص (DELTA2000) المُصنّع بواسطة شركة (MEGGER).

7. تصحيح القيمة المُقاسة

يُعد هذا الفحص من الفحوصات التي تتأثر قيمتها بتغيّر درجة حرارة المادة العازلة تحت الفحص والتي تتمثل بحرارة الزيت والملفات للمحولات المغمورة بالزيت كما تم ذكره مُسبقاً، لذلك ولغايات مقارنة القيم الناتجة عن هذا الفحص بقيم فحوصات القبول المصنعية (Factory Acceptance Test - FAT) أو الموقعية (Site Acceptance Test - SAT) أو غيرها من القيم المرجعية كنتائج الفحوصات الروتينية السابقة (Routine Test) لهذا الفحص يُصح بتصحيح القيمة الناتجة من الفحص الى درجة الحرارة المرجعية القياسية وهي عادة (20°) درجة مئوية. بحيث تتم عملية التصحيح بالإعتماد على معادلات وجداول أوردتها بعض المعايير العالمية والمراجع والنشرات التقنية الصادرة عن الشركات المُصنّعة لأجهزة الفحص أو المحولات وعوازل الإختراق كالآتي:

7.1 معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE)

بالإعتماد على المعادلة (5.20) الواردة في المعيار الصادر عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Std C57.12 90-2006] يُمكن تصحيح قيمة معامل القدرة كالآتي:

$$PF_{20} = \frac{PF_m}{k} \quad (5.20)$$

حيث؛

PF_{20} : (القيمة المُراد حسابها) قيمة معامل القدرة نسبة لدرجة الحرارة المرجعية (20°) درجة مئوية.

PF_m : قيمة معامل القدرة المُقاسة.

k : ثابت التصحيح، حيث يُمكن معرفة قيمته بالرجوع إلى الجدول (5-5) ولخاص بالمحولات ذات نظام العزل المكون من الزيت المعدني (Mineral oil).

الجدول رقم (5-5)

درجة الحرارة (°C)	معامل التصحيح
10	0.80
15	0.90
20	1.00
25	1.12
30	1.25
35	1.40
40	1.55
45	1.75
50	1.95
55	2.18
60	2.42
65	2.70
70	3.00

7.2 الكُتيبات التفصيلية الصادرة عن شركة (MEGGER) وشركة (DOBLE)

يُمكن تصحيح قيمة معامل التبديد/القدرة المُقاسة بالإعتماد على المعادلة (5.21) الواردة في الكُتيب التفصيلي الخاص بجهاز الفحص (DELTA2000 manual) المُصنَّع بواسطة شركة (MEGGER) وكذلك الكُتيب التفصيلي الصادر عن شركة (Doble) ولخاص بخطوات الفحص [Doble Test Procedure, 72A-2244 Rev.A]

$$DF_{20} \text{ or } PF_{20} = k \cdot (DF_m \text{ or } PF_m) \quad (5.21)$$

حيث؛

DF_{20} : (القيمة المُراد حسابها) قيمة معامل التبديد نسبة للحرارة المرجعية (20°) درجة مئوية.

DF_m : قيمة معامل التبديد المُقاسة.

k : ثابت التصحيح، حيث يُمكن معرفة قيمته بالرجوع إلى الملحق رقم (5-4).

7.3 النشرات التقنية الصادرة عن شركة (ABB)

وبالرجوع للنشرات التقنية الخاصة بعوازل إختراق المحولات (Bushings) من النوع (OIP و RIP) والمُصنَّعة بواسطة شركة (ABB) فإنه يُمكن الإعتماد على المعادلة (5.22) الآتية في تصحيح قيمة معامل التبديد المُقاسة. [ABB, Bushing diagnostics and conditioning, 2750 515-142 en, Rev.1].

$$DF_{20} = \frac{DF_m}{k} \quad (5.22)$$

حيث:

DF_{20} : (القيمة المُراد حسابها) قيمة معامل التبديد نسبة للحرارة المرجعية (20°) درجة مئوية.

DF_m : قيمة معامل التبديد المُقاسة.

k : ثابت التصحيح، حيث يُمكن معرفة قيمته بالرجوع إلى الجدول (5-6) وللخاص بعوازل الإختراق من النوع (OIP و RIP).

الجدول رقم (5-6)

نطاق درجة الحرارة (°C)	معامل التصحيح لعوازل الإختراق من النوع OIP	معامل التصحيح لعوازل الإختراق من النوع RIP
0 - 2	0.80	0.76
3 - 7	0.85	0.81
8 - 12	0.90	0.87
13 - 17	0.95	0.93
18 - 22	1.00	1.00
23 - 27	1.05	1.07
28 - 32	1.10	1.14
33 - 37	1.15	1.21
38 - 42	1.20	1.27
43 - 47	1.25	1.33
48 - 52	1.30	1.37
53 - 57	1.34	1.41
58 - 62	1.35	1.43
63 - 67	1.35	1.43
68 - 72	1.30	1.42
73 - 77	1.25	1.39
78 - 82	1.20	1.35
83 - 87	1.10	1.29

أثبتت التحارب المختلفة أن التباين في قيمة معامل التبريد/القدرة الناتج عن إختلاف قيمة درجة الحرارة عند الفحص كبير وغير منتظم، لذلك لا يُمكن الإعتماد على منحنى معين لتصحيح أو جدول واحد وهذا بدوره يُفسر وجود أكثر من منحنى وحدول لتصحيح. فكما ورد في المعيار الصادر عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Std C57.12.90-2015] أنه لا حاجة لتصحيح قيمة معامل التبريد/القدرة المُقاسة وإنما يتم الإكتفاء بذكر قيمة الفحص إلى جانب درجة حرارة الزيت العلوي (Top oil temperature) عند القياس فقط. وبشكل عام فإنه لا حاجة لتصحيح عند فحص المحولات المغمورة بالزيت ذات السعة (Capacity) الأكبر من (500kVA) كيلوفولت أمبير عند التردد الإسمي (50Hz أو 60Hz) هيرتز ودرجة حرارة الزيت العلوي (Top oil temperature) محصورة بين (0° و 30°) درجة مئوية كما ورد في كتاب [Jill C. Duplessis, Electrical Field Tests for the Life Management of Transformers]

ملحوظة (5-11): عند إجراء هذا الفحص لعوازل إختراق المحولات (Bushings) من خلال تطبيق الفولتية على مأخذ الفحص (Test tap) فإن القيمة المُقاسة لا تحتاج لتصحيح كما هو الحال عند قياس العزل الرئيسي لعازل الإختراق.



8. تحليل نتائج الفحص

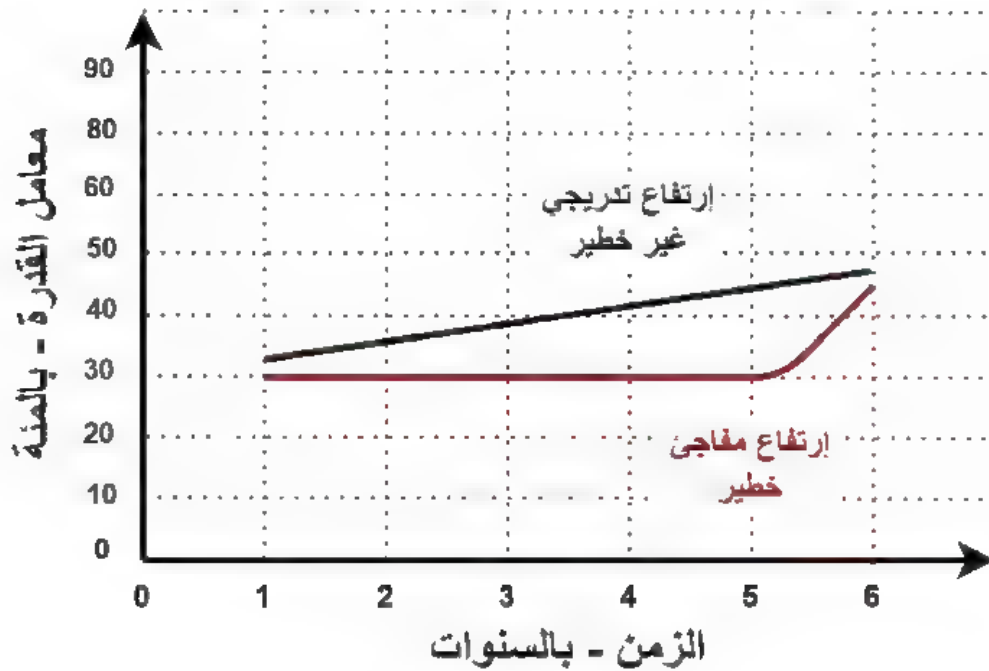
يهدف فحص معامل التبريد/القدرة الى معرفة مدى جودة وكفاءة العزل الكهربائي للمحول وعازل الإختراق (Bushing)، وتكون قيمة هذا الفحص على شكل نسبة مئوية من صفر إلى مئة بحيث يدل الصفر على أن مادة العزل نظيفة و جافة ولا تحتوي على فجوات وكذلك خالية من أية دلائل على أن هذه المادة غير قادرة على القيام بالعزل المطلوب.

لذلك وبعد تصحيح القيم المُقاسة وفقاً لما تم شرحه في الفقرة السابقة مع التذكير أنها خطوة غير إلزامية حيث أنه ينصح بإجراء هذا الفحص عن درجة حرارة قرابة الـ (20°) درجة مئوية، يتم تحليل نتائج الفحص بعدة طرق كالآتي:

8.1 الطريقة الأولى: مقارنة نتائج الفحص بنتائج سابقة للمُعَدّة (نتائج الفحوصات القصصية (FAT) أو الموقعية (SAT) أو الروتينية)، و في حال وجود مجموعة نتائج سابقة يُمكن مقارنة هذه النتائج وتبّع إختلافها مع الزمن (Trend).

عند مقارنة نتائج الفحص للمحول أو عازل الإختراق (Bushing) بنتائج فحص سابقة لنفس المحول أو عازل الإختراق يجب التأكد من عدم وجود تغيّر في قيمة معامل التبريد/القدرة أو المواسعة، بحيث أي تغيّر يستلزم بحث معمق سيتم التحدث عنه لاحقاً بشكل مفصل. ولكن عند مقارنة قيمتين للفحص فقط (حالية و سابقة) فإن تحليل النتائج قد يكون صعب ومضلل، حيث أن نتيجة فحص سابقة واحدة قد لا تكون كافية للكشف عن وجود عطل والجزء بذلك فكما يظهر بالشكل (21-5) هنالك حالتين؛ الحالة الأولى لمحول معامل القدرة الحاص به يرتفع بشكل طفيف وتدرجي مع الزمن بشكل غير حطر وهو ما يُمكن ملاحظته بوجود نتيجة فحص سابقة واحدة علماً بأنه دليل على عطل غير حطر، أما الحالة الثانية

وهي لمحول معامل القدرة الخاص به ثابت مع الزمن ولكن يرتفع بشكل مفاجئ وخطير بعد فترة من الزمن وهو ما لا يُمكن ملاحظته بسهولة في حال كانت هنالك نتيجة فحص سابقة واحدة.



الشكل رقم (21-5)

لذلك كلما كان هنالك نتائج فحص سابقة أكثر كلما زادت كفاءة تحليلها من خلال رسم وتتبع إحتلاف قيم هذه النتائج مع الزمن (Trend).

وكذلك الحال فيما يخص قيمة فحص المواسعة (Capacitance)، حيث أن قيمة التباين المسموح بها هي خمسة بالمئة (5%) بالمئة بعد مقارنتها بقيمة الفحوصات المصنعية أو الموقعية أو الروتينية السابقة كما ورد بالمعيار الصادر عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE, C57.152-2013]، أما المرجع [Jill C. Duplessis, Electrical Field Tests for the Life Management of Transformers] فقد حدد قيمة التباين الخاصة بفحص المواسعة (Capacitance) بما مقداره (1%) بالمئة من قيمة الفحوصات السابقة، وأي قيمة تباين أكبر من ذلك تُعتبر غير مقبولة وتستدعي البحث المُعمق في أسباب الإختلاف، أما المحولات القديمة (أي الأكبر من 40 عام) فقد تصل قيمة التباين المسموح بها إلى (2%) بالمئة.

8.2 الطريقة الثانية: مقارنة نتائج الفحص بـ قيم مرجعية موصى بها عبر المعايير والمراجع العالمية أو من قبل المُصنّعين (Manufacturers).

كقاعدة عامة عادةً ما تكون قيمة معامل القدرة أقل من (0.5%) بالمئة عند درجة حرارة (20°) مئوية لمنظومة العزل بين ملفات الفولتية المرتفعة والمنخفضة أو بين الملفات والأرضي للمحولات الجديدة، أما فيما يخص المحولات القديم فإن قيمة معامل القدرة قرابة (1%) تعتبر نتيجة مقبولة نوعاً ما خاصة في حال لم يَكُن هنالك قيم مرجعية مُسبقة، وقد تزيد قيمة هذا الفحص لبعض الحالات الخاصة

كالمحولات القديمة جداً أو كالتى تستخدم عزل الورنيش (Varnished-cambric) التى قد يصل قيمة معامل القدرة لها أكثر من (4%) بالمئة عند درجة حرارة (20°) مئوية.

مما سبق يُمكن تقييم حالة العازل بشكل عام معتمدين أكثر على الخبرة مما يجعل هذا التقييم قليل الدقة، لذلك لا بد من الرجوع للمعاهد واللجان الكهربائية العالمية في هذا الشأن فقد أوردت الكثير من المعايير (Standards) و المراجع العالمية بعض القيم المرجعية لهذا الفحص والتي يُمكن الإعتماد عليها في تقييم حالة المحولات ككل أو عوازل إختراق هذه المحولات (Bushings)، ويبقى الخيار متروك لمهندس الفحص في الإعتماد على واحدة أو أكثر من هذه القيم المرجعية وفقاً للخبرة أو المعايير المعمول بها في المنشأة أو كما هو موصى به من قبل المُصنعين (Manufactures).

ملحوظة (5-12): كما ذكر سابقاً فإنه يُمكن التعبير عن نتيجة هذا الفحص بنسبة مئوية أو رقم من واحد لمئة، فإذا ذكر مثلاً أن معامل القدرة/التبديد (1%) فهي نفسها (100) وإذا ذكر (0.5%) فهي نفسها (50) وهكذا.



✓ المحولات المغمورة بالزيت

عادة لا يتم تصميم قيم محددة لهذا الفحص من قبل مُصنعي المحولات في لوحة البيانات الخاصة بالمحول فيما يخص المحول ككل وذلك لصعوبة تقييم المادة العازلة بالمحول، ولكن حسب الخبرة فإن قيمة المواسعة لملفات المحول تتراوح من عدة (nF) نابوفاراد إلى عدة عشرات من (nF)، فبالرجوع إلى المعيار الصادر عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE, C57.152-2013] يُمكن إيجاد الجدول (5-7) التالي فيما يخص القيم المرجعية لفحص معامل القدرة للمحولات المغمورة بالزيت مُصححة (Corrected) لدرجة حرارة (20°) درجة مئوية للمحولات ذات الزيت المعدني، أما محولات زيت الإستر فإن القيم لم يتم تصحيحها لقلة المعلومات عن هذا الزيت بهذا الخصوص:

الجدول رقم (5-7)

نوع زيت المحول	فولتية المحول	الحد الأعلى لقيمة معامل القدرة (للمحولات الجديدة)	الحد الأعلى لقيمة معامل القدرة (للمحولات القديمة)
زيت معدني - Mineral oil	< 230	0.5%	1.0%
	≥ 230	0.4%	1.0%
إستر طبيعي - Natural ester	All	1.0%	1.0%

أما فيما يخص قيمة فحص الموسعة للمحولات فإن ذات المعيار [IEEE, C57.152-2013] أورد القيم المضمنة في الجدول (5-8) التالي:

الجدول رقم (5-8)

الإختلاف في قيمة الموسعة المُقاسة	حالة المحول
أقل من 5%	جيد
5% - 10%	يحتاج لبحث حول أسباب إرتفاع القيمة
أكثر من 10%	إخراج المحول من الخدمة وإجراء بحث مُعمّق

وكذلك يُمكن إيجاد الجدول (5-9) التالي والصادر عن شركة (MEGGER) والمُضمّن في الكُتَيْب التفصيلي الخاص بجهاز الفحص (DELTA2000 Manual) فيما يخص نتائج فحص معامل التسديد/القدرة النموذجية للمحولات المغمورة بالزيت.

الجدول رقم (5-9)

المحول تحت الفحص	مستوى الفولتية	القيمة النموذجية لمعامل التبديد/القدرة
محول جديد	أكبر من 115 كيلوفولت	0.25% - 1.0%
محول قديم (أكبر من 15 سنة)	أكبر من 115 كيلوفولت	0.75% - 1.5%
محول توزيع	فولتية منخفضة	1.5% - 5%

وأيضاً يُمكن الإعتماد على الجدول (5-10) الوارد في المرجع [Jill C. Duplessis, Electrical Field Tests for the Life Management of Transformers] فيما يخص تحليل نتائج هذا الفحص للمحولات المغمورة بالزيت ذات السعة الأكبر من (500kVA) كيلوفولت أمبير.

الجدول رقم (5-10)

نتيجة فحص معامل التبديد/القدرة	التقييم
0.2% - 0.3%	مثالي
أقل من 0.5%	جيد
0.5% - 0.7%	متدهور نوعاً ما
0.5% - 1% ويزداد	يحتاج لبحث
أكثر من 1%	غير مقبول (لا يجب وضعه بالخدمة)

✓ عوازل الإختراق (Bushings)

عادة ما يتم تضمين قِيم محددة لهذا الفحص من قِبَل مُصنَّعي عوارل الإختراق (Bushings) في لوحة البيانات الخاصة بها (Nameplate) والتي تكون بمثابة مرجع في عملية التحليل، الشكل (5-22) يبين نموذج للوحة بيانات عازل إختراق (Bushing Nameplate) مُصنَّع من قِبَل شركة (PASSONI VILLA) الإيطالية والمملوكة حالياً لشركة (GENERAL ELECTRIC) الأمريكية.

PASSONI VILLA		MILAN ITALY	SERIAL NR	M/YEAR
PASSANTE-BUSHING-TRAVERSEE-DURCHFÜHRUNG				
TYPE				
STD REF				50-60Hz
Um	kV	BIL/SIL/AC	kV	Ir A
C1	pF	C2	pF	P F % AT 10kV/20°C
	kg			

الشكل رقم (5-22)

من لوحة البيانات القُبية في الشكل السابق يُمكن إيجاد قيمة معامل القدرة (PF) وكذلك الموسعة الرئيسية الخاصة بهذا العازل (C1) حيث و بالرجوع إلى بعض الكُتيبات التفصيلية (Manuals) الخاصة بهذا النوع من العوازل كتلك الصادرة عن إحدى كُبرى الشركات المُصنَّعة لعوازل الإختراق كشركة (ABB) فإن إختلاف قيمة الموسعة (C1) بمقدار (3%) بالمئة عن القيمة المُضمَّنة في لوحة البيانات فإنه يدل على وجود مشكلة أولية في هذا العازل (Partial puncture). أما بالرجوع للمرجع [Paul Gill, Electric Power Equipment Maintenance and Testing] فإن قيمة التباين المسموح بها عند مقارنة نتيجة الموسعة المفحوصة بقيمة الموسعة المُضمَّنة بلوحة البيانات الخاصة بعازل الإختراق هي (±10%) بالمئة.

كما وأوردت المعايير العالمية مجموعة من القِيم المرجعية التي يُمكن الإعتماد عليها في تحليل نتائج هذا الفحص كتلك المعايير الصادرة عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE, C57.19.01-2017] فيما يخص الحدود العليا لهذا الفحص بالإضافة إلى قيمة التباين المسموح بها لعوارل الإختراق المُختلفة كما هو مُبين في الجدول (5-11) عند درجة حرارة (20°) درجة مئوية.

الجدول رقم (5-11)

نوع عازل الإختراق	معامل القدرة عند (20°) درجة مئوية		
	الحد المسموح به (%)	التغير المسموح به (%)	الموسعة التغير المسموح به (%)
OIP	0.50	+0.02 / -0.04	±1.00
RIP	0.85	±0.04	±1.00
RBP	2.00	±0.08	±1.00
Cast insulation	1.00	±0.04	±1.00

الجدول (5-12) يُبين الحدود العليا لفحص معامل التبريد عند تطبيقه على عوارل الإختراق المختلفة كما جاء في المعايير الصادرة عن اللجنة الكهروتقنية الدولية [IEC, 60137-2017] و المجلس الدولي للأنظمة الكهربائية الكبيرة [CIGRE, Guide for Transformer Maintenance 445] عند درجة حرارة (20°) درجة مئوية والتردد الإسمي (50Hz) هيرتز أو (60Hz) هيرتز.

الجدول رقم (5-12)

معامل التبريد (%) عند (20°) درجة مئوية		نوع عازل الإختراق
CIGRE	IEC 60137	
0.2 - 0.4	< 0.7	OIP
0.3 - 0.4	< 0.7	RIP
0.5 - 0.6	< 1.5	RBP

الجدول (5-13) يُبين القيم المسموح لفحص معامل التبريد عند تطبيقه على عوارل الإختراق من النوع (OIP) و (RIP) كما جاء في النشرة التقنية الصادرة عن شركة (ABB) المُصنعة لعوارل الإختراق.

الجدول رقم (5-13)

معامل التبريد	التقييم
0 - 25%	جيد
25% - 40%	بحاجة لبحث وإعادة الفحص
40% - 75%	بحاجة لبحث مُعمّق وإعادة الفحص بعد شهر
أكثر من 75%	غير مقبول ويجب إخراج عازل الإختراق من الخدمة

كما وتُجدر الإشارة إلى مجموعة من القيم المرجعية الخاصة بهذا الفحص وفقاً للنوع وللشركة المُصنعة لعازل الإختراق (Bushing) والمُضمن في الملحق رقم (5-5) كما ورد في النشرة التقنية [USBR, Testing and Maintenance of High-Voltage Bushings Vol 3-2].

8.3 الطريقة الثالثة: مقارنة نتائج الفحص بنتائج فحص لمُعَدّة مُشابهة تماماً (Twin or Sister).

هذه الطريقة تتم من خلال مقارنة نتائج الفحص المُقاسة بنتائج فحص لمحول مُشابه تماماً بالمواصفات والظروف التشغيلية والبيئة المحيطة أيضاً، على أن لا تتجاوز قيمة التباين القيم سابقة الذكر

ملحوظة (5-13): عند إجراء هذا الفحص وتم ملاحظة إختلاف في قيمة معامل التبريد/القدرة وكذلك الموسعة معاً فإن ذلك يُعد دليلاً على رطوبة المادة العازلة، أما في حال كان الإختلاف فقط بنتيجة فحص معامل التبريد/القدرة فإن ذلك يدل على تدهور المادة العازلة نتيجة للإجهاد الحراري أو تلوثها بمواد أخرى غير الرطوبة. [MEGGER,

DELTA2000 Device Manual]



9. العوامل المؤثرة على نتيجة الفحص

هناك عدة عوامل مؤثرة على نتيجة هذا الفحص والتي لا بُد من الإحاطة بها من أجل تحييد تأثيرها أو التخفيف منه على الأقل، ومن هذه العوامل:

9.1 تأثير الكوابل والبسبارات – Effect of cables and busbars

إن إبقاء الكوابل أو مجمعات القضبان (Busbars) مُتصلة بعوازل إحتراق المحول (Bushings) أثناء الفحص قد يؤثر على نتيجة فحص المواسعة، فكما هو معلوم أن المواسعة تعتمد على حجم نظام العزل وبالتالي فإن ترك هذه الكوابل ومجمعات القضبان بالإضافة إلى أي أجزاء أخرى موصولة معها مثل عوارل التثبيت (Support isolators) من شأنه زيادة قيمة المواسعة المُقاسة من خلال هذا الفحص خاصة لمُركبة العزل بين الملفات و الأرض (CH و CL)

9.2 تأثير زيت المحول – Effect of mineral oil

يجب مراعاة ألا يكون المحول مُفرغ من الزيت عند الفحص بحيث أن قيمة المواسعة تتناسب طردياً مع ثابت العازل (Dielectric Constant) الذي يختلف من مادة لأخرى، إذ أن ثابت العزل الخاص بالهواء أقل من نصف قيمة ثابت العزل الخاص بالزيت لذلك فإن قيمة المواسعة للمادة العازلة داخل المحول المُفرغ من الزيت أقل من قيمة المواسعة للمحول المليء بالزيت.

ومن جهة أخرى ولأسباب تتعلق بالسلامة فإنه لا يُنصح بإجراء هذا الفحص في حال كان المحول مُفرغ من الزيت خوفاً من وجود غازات قابلة للإشتعال ونتيجة لظهور شرارة قوس كهربائي أثناء الفحص مما قد يتسبب بإفجار الخزائ، وفي حال أردنا إجراء هذا الفحص على المحول وهو مُفرغ من الزيت يجب تطبيق فولتية منخفضة إي قرابة الـ (10%) بالمئة من فولتية الفحص الاعتيادية بالإضافة إلى التأكد من أن الهواء داخل خزان المحول لا يحتوي على غازات قابلة للإحتراق وذلك عن طريق حقن غار النيتروجين الجاف عوضاً عن الهواء لتقليل نسبة غار الأوكسجين إلى أقل من (2%) بالمئة، وبالإضافة إلى ذلك فإنه يُسمع إجراء هذا الفحص في حال كان الضغط الداخلي لخزان المحول أقل من الضغط الخارجي أي أن المحول مُفرغ من الهواء أيضاً (Under Vacuum).

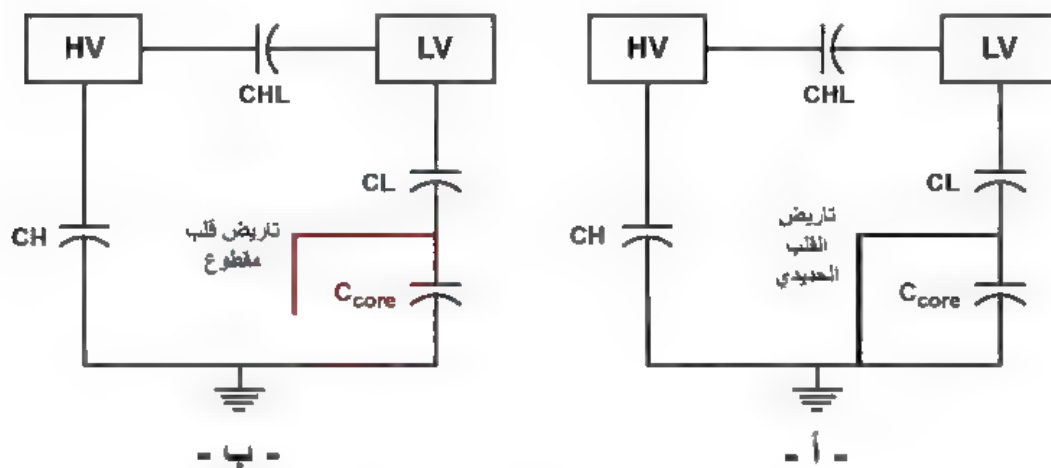
الجدول (5-14) يُبين بعض قِيم فولتيات الفحص عند إجراء هذا الفحص على المحولات المُفرغة من الزيت مع الحذر الشديد كما ورد في الكتيب التفصيلي الخاص بخطوات الفحص [Doble Test Procedure, 72A-2244 rev.A] الصادر عن شركة (Doble):

الجدول رقم (5-14)

فولتية الفحص المقترحة بالكيلوفولت (Line to Ground kV)	الفولتية الإسمية لمعدات المحول بالكيلوفولت (Line to Line kV)	توصيلة ملفات المحول
10	أكثر من أو يساوي 161	مثلث (Delta - Δ) أو نجمة (Star - Y) غير مؤرضة
5	115 - 138	
2	34 - 69	
1	12 - 25	
0.5	أقل من 12	
1	أكثر من أو يساوي 12	نجمة (Star - Y) مؤرضة أو آحادي الطور مع نقطة تعادل
0.5	أقل من 12	

9.3 تأثير فقدان تأريض القلب الحديدي – effect of loss of core ground

كما تم شرحه في الفصل الأول فإنه يتم تأريض القلب الحديدي للمحول وذلك للتخلص من التيارات الدوارة وما ينتج عنها من إحماء، وعند إجراء هذا الفحص يجب التأكد أن القلب الحديدي موصول بالأرض تجنباً لتأثيره على قيمة المواسعة المقاسة، فكما هو مبين بالشكل (5-23) عندما يكون القلب الحديدي غير موصول بالأرض تُضاف مواسعة القلب الحديدي للأرض (C_{core}) على التوالي مع مواسعة ملفات الفولتية المنخفضة والأرض (CL) مما يعني قيمة مواسعة مكافئة أقل من الحقيقية.



الشكل رقم (5-23)

في الشكل [(5-23) (أ)] تُشكل وصلة التأريض دائرة قصر (SC) على مواسعة القلب لذلك لا تؤثر قيمة هذه المواسعة على قيمة مواسعة ملفات الفولتية المنخفضة (CL)، أما في حال وجد قطع بالأرضي الخاص

بالقلب الحديدي فإن مواسعة القلب (C_{core}) تكون على التوالي مع مواسعة ملفات الفولتية المنخفضة (CL) مما يفسر ظهور مواسعة مكافئة (C_{eq}) أقل من قيمة (CL) المطلوبة.

ملحوظة (5-14): كما وتُجدر الإشارة إلى أنه في حال ترك نقطة التعادل (Neutral) الخاص بملفات الفولتية المنخفضة موصولة بالأرض أثناء الفحص سيؤثر ذلك على قيمة المواسعة (CHL) المُقاسة.



9.4 تأثير عوازل الإحتراق على نتيجة الفحص – Effect of bushings

بالرجوع الى ما تم شرحه مسبقاً فإن قيمة معامل التبديد/القدرة هي قيمة متوسطة وعامة، لذلك عند فحص المحولات ككل فإن عوازل الإحتراق (Bushings) الموصولة بالمحول تؤثر على الفحص إما بزيادة قيمة معامل التبديد/القدرة أو بإنقاصه كالآتي:

- في حال كانت عوازل إحتراق المحول ذات قيمة معامل قدرة مُتدني وملفات المحول كانت قيمة معامل القدرة لها مقبولة، فإن النتيجة النهائية للفحص قد تكون مُتدنية نتيجة لتأثير عوازل الإحتراق على الفحص، مما يُعطي إنطباع أن المحول ككل ذو قيمة معامل قدرة غير مقبولة وهذا غير صحيح حيث أن الملفات سليمة ولكن المشكلة بعوازل الإحتراق فقط.
- في حال كانت ملفات المحول ذات قيمة معامل قدرة مُتدني وعوازل إحتراق المحول (Bushings) كانت قيمة معامل القدرة لها مقبولة، فإن النتيجة النهائية للفحص قد تكون مُتدنية نتيجة لتأثير الملفات على الفحص، مما يُعطينا إنطباع أن المحول ككل ذو قيمة معامل قدرة غير مقبولة وهذا غير صحيح حيث أن عوازل الإحتراق سليمة ولكن المشكلة بالملفات. وتكمن المشكلة الرئيسية في حال أن عوازل الإحتراق السليمة أثرت على الفحص وجعلته مقبولاً ككل مما يعيق الكشف عن وجود مشكلة بعزل الملفات.

في هذه الحالة وللتخلص من تأثير قيمة معامل القدرة الخاص بعوازل الإحتراق (Bushings) على قيمة معامل القدرة للملفات، فإنه يتم اللجوء إلى طرح تأثير عوازل الإحتراق وذلك بإتباع الخطوات التالية في حال أردنا إزالة تأثير عوازل إحتراق الفولتية المرتفعة (HV Bushings) على ملفات الفولتية المرتفعة للمحول (CH):

- ✓ قياس قيمة معامل القدرة لمُرَكبة العزل الرئيسي (CI) لجميع عوازل الإحتراق حتى الخاصة بنقطة التعادل في حال كانت الملفات موصولة على شكل نجمة (Y - Star).
- ✓ تسجيل قيمة التيار (Current) بالمبي أمبير وكذلك قيمة الخسائر بالقدرة (Watt loss) بالواط لجميع عوازل الإحتراق.
- ✓ جمع قيمة التيار لعوازل الإحتراق جميعها وكذلك قيم الخسائر في القدرة (Watt loss).
- ✓ قياس قيمة معامل القدرة للمحول ككل (مع عوازل الإحتراق)
- ✓ تسجيل قيمة التيار (Current) بالمبي أمبير وكذلك قيمة الخسائر في القدرة للمحول ككل.

- ✓ طرح قيمة التيار الكلي لعوازل الإختراق من قيمة التيار الكلي للمحول.
- ✓ طرح قيمة الخسائر في القدرة الكلية لعوازل الإختراق من قيمة الخسائر في القدرة للمحول ككل
- ✓ حساب قيمة معامل القدرة للملفات لوحدها بالإعتماد على قيمة التيار وخسائر القدرة المحسبة على إعتبار أن الفحص تم على (10kv) كيلوفولت وفقاً للمعادلة التالية.

$$PF\% = \frac{Watt\ loss}{Test\ voltage \times leakage\ current} \times 100 \quad (5.23)$$

الجدول (5-15) يوضح مثال على طرح تأثير عوازل الإختراق على القيمة الكلية لمعامل القدرة للمحول، على إفتراض أن القيمة المُقاسة لمعامل القدرة للمحول هي (0.48%) بالمئة وأردنا إزالة تأثير عوازل إختراق الفولتية المرتفعة (HV Bushings).

الجدول رقم (5-15)

المواسعة الكلية لعازل الإختراق (Cl)	التيار المُتسرب	خسائر العازل (watts)	قيمة معامل القدرة المُحتسبة (%)
H1	2.72	0.204	0.75
H2	2.61	0.155	0.59
H3	2.62	0.277	1.06
H0	2.60	0.092	0.35
مجموع تأثير عوازل إختراق الفولتية المرتفعة	10.55	0.728	-
CL	46.14	2.21	0.48
CL بعد طرح تأثير عوازل إختراق الفولتية المرتفعة	35.59	1.482	0.42

من الجدول السابق يُمكن ملاحظ تحسُّن قيمة معامل القدر للمحول بعد إزالة تأثير عوازل الإختراق على قيمة فحص معامل القدرة للمحول، حيث أن قيمة معامل القدرة للمحول ككل كانت (0.48%) بالمئة وأصبحت (0.42%) بالمئة.

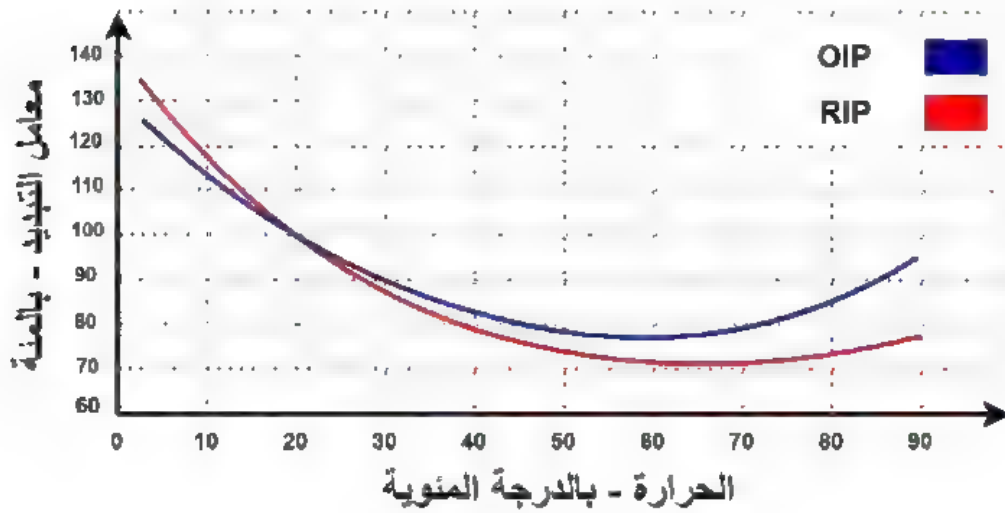
9.5 تأثير إستبدال عوازل الإختراق أو زيت المحول – Effect of bushings or oil changing

كما هو معلوم أن عوازل الإختراق و زيت المحول تُعد من المكونات الرئيسية لمنظومة العزل، لذلك عند إستبدال عازل إختراق قديم بواحد آخر جديد ذو أبعاد هندسية ومنظومة عزل مختلفة عن عازل الإختراق القديم، فإنه من المؤكد الحصول على نتيجة فحص مُتباينة عن سابقتها من النتائج، وفي هذه الحالة يجب الإكتفاء بإجراء هذا الفحص من جديد وحفظ نتيجته كقيمة مرجعية للفحوصات القادمة.

وكذلك الحال فيما يخص زيت المحول فإنه في حال إستبدال زيت المحول بریت جدید معدني أو سيليكوي أو طبيعى كالإيسترات أو غيرها من الزيوت فإنه من المؤكد الحصول على نتيجة فحص مُتباينة عن سابقتها من النتائج، ويعود السبب بذلك لإختلاف ثابت العزل (Dielectric constant) لهذه الأنواع عن بعضها البعض.

9.6 تأثير درجة الحرارة – Effect of temperature

كما ذكر سابقاً فإن حساسات المادة العازلة تتأثر بدرجة الحرارة، حيث أن التغير المُفاجئ لدرجة حرارة الجو المحيط (Ambient temperature) والذي سوف يُصاحبه تغير في درجة حرارة المحول أو عازل الإحتراق (Bushing) سيؤثر على قيمة معامل التبيد/القدرة، الشكل (5-24) يوضح إختلاف قيمة معامل التبيد بإختلاف درجة الحرارة لعوازل الإحتراق من النوع (OIP و RIP).



الشكل رقم (5-24)

ومنه فإنه لا يُنصح بإجراء هذا الفحص في درجة حرارة جو محيط (Ambient temperature) أقل من درجة حرارة تكوّن قطرات الندى (Dewpoint temperature)، حيث أنه لو إفتراضاً وجود شق (Crack) في سطح المادة العازلة الخارجي وكان هنالك ماء في هذا الشق وكما هو معلوم فإن الماء تحت درجات تكوّن قطرات الندى يكون قد تحول لجليد، وهذا الجليد تختلف خصائصه تماماً عن الماء وأهمها فقدانه للموصلية الكهربائية حيث أن مقاومته الحجمية (Volumetric Resistivity) أي مقاومته لمرور التيار التسريبي من خلاله أكبر قرابة (144) مرة من الماء مما يعني ظهور نتيجة فحص مُرضية ولا تعكس الحالة الحقيقية للمادة العازلة.

لذلك ولتجنب تأثير درجة الحرارة فإنه يُنصح بالآتي:

- ✓ إجراء هذا الفحص في أوقات مُتأخرة من الصباح إلى منتصف الظهيرة لتجنب درجات الحرارة المُتدنية وما ينتج عنها من تأثير على نتيجة هذا الفحص، أو تأجيل الفحص ليوم آخر مُشمس وصافي في حال لم تتوفر الشروط المناسبة.
- ✓ إجراء الفحص بعد فصل المحول مباشرة أي قبل نزول درجة حرارة المحول.
- ✓ تغطية المحول وتسليط هواء ساخن لرفع درجة حرارته قبل الفحص.

9.7 تأثير تيار التسرب السطحي – Effect of Surface Leakage Current

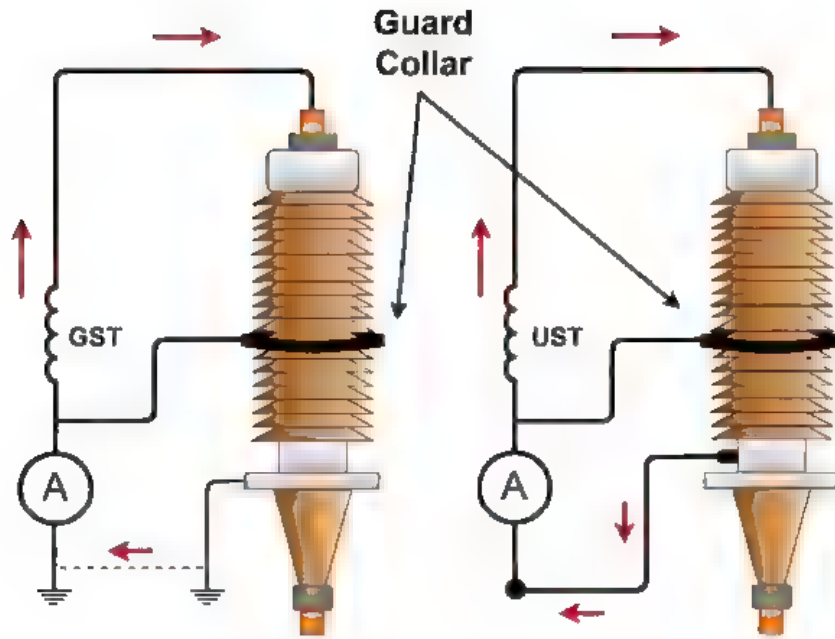
إن أغلب محولات القدرة المغمورة بالزيت عادةً ما تكون بالخارج (Outdoor) مما يعني تعرضها للعوامل الجوية الخارجية ومن أهم هذه العوامل الحرارة بالإضافة للرطوبة والملوثات كالغبار وغيره من الملوثات، لذلك يجب الأخذ بعين الاعتبار هذه العوامل عند إجراء هذا الفحص خاصة وأنها جميعها تؤثر على نتيجة هذا الفحص بطريقة أو بأخرى، فمثلاً درجة الحرارة من شأنها تغيير خصائص المادة العازل الكهربائية مما يؤدي للتأثير على قيمة هذا الفحص كما تم شرحه سابقاً و للتقليل من تأثير درجة الحرارة على الفحص هنالك طرق لتصحيح القيمة المُقاسة كتلك المذكورة في فقرة تصحيح القيمة المُقاسة، ولكن التحدي الأكبر هو التخلص من تأثير الرطوبة حيث أنه لا يوجد معامل تصحيح خاص بالرطوبة أي أنه لا يُمكننا تصحيح قيمة معامل التبديد/القدرة المُقاسة عند درجة رطوبة معينة.

ولكن قبل الحوض في الأمور الواجب مراعاتها للتخلص من تأثير الرطوبة لا بُد لنا من معرفة كيف تؤثر الرطوبة على قيمة معامل التبديد/القدرة؛ إن زيادة مستوى الملوثات على سطح العازل بالإضافة لزيادة نسبة الرطوبة الجوية فإنه ينشأ تيار تسري على سطح العازل (المورسلان الخارجي لعوازل الإختراق على سبيل المثال) من شأنه التأثير على نتيجة الفحص ولكن بضوابط مُعينة ووفقاً لإعتبارات كثيرة منها:

- ✓ عند إجراء هذا الفحص بأسلوب العينة غير المؤرضة (UST) فإن تأثير هذه التيارات التسريبية يُمكن إهمالها على النقيض من الفحص بأسلوب العينة المؤرضة (GST)
- ✓ عند إجراء هذا الفحص على مُعدات ذات مواسعة كبير كمحولات القدرة على النقيض من المُعدات ذات المواسعة الأقل كعوازل الإختراق (Bushings) وحارفات الصواعق (Surge Arrestor) وذلك لأن الضياعات في القدرة كبيرة لمحولات القدرة مما يجعل الخسائر الناتجة عن التيارات التسريبية مهمة ولا تؤثر على قيمة الفحص.
- ✓ لا خوف على المحولات وعوازل إختراقها من هذه التيارات التسريبية حيث أن المحولات عادة ما تكون حرارتها مرتفعة مما يقلل رطوبة سطحها حيث أن الرطوبة الجوية لا تتكثف على الأسطح الدافئة وهذا بدوره يقلل قيمة التيارات التسريبية.
- ✓ إذا كان سطح العازل نظيف فإن رطوبة سطح العازل لا تُشكّل عائقاً لإجراء الفحص نظراً لتأثيرها المُهمل.

لذلك وللتخلص من تأثير هذه التيارات التسريبية يُمكن إتباع الآتي:

- ✓ تنظيف سطح العازل (البورسلان الخارجي لعوازل الإختراق عادة) مما يُقلل من الضياعات.
- ✓ إجراء الفحص أثناء رطوبة حوية مناسبة علماً بأن نسبة الرطوبة (70% - 50%) بالمئة تُعتبر متوسطة وأكثر من (70%) بالمئة تُعتبر مرتفعة كقاعدة عامة.
- ✓ استخدام (Guard Collars) على حلقات العازل السفلية قدر الإمكان (Bottom Skirt) لتحديد قيمة تيارات التسرب السطحي كما هو مُبين بالشكل (25-5).



الشكل رقم (5-25)

هناك العديد من العوامل التي تؤثر على نتيجة هذا الفحص غير العوامل المذكورة سابقاً والتي تُعدّ الأكثر شيوعاً، فبالرجوع إلى كتاب [Jill C. Duplessis, Electric Field Tests for the Life Management of Transformers] يُمكن إيجاد جدول يَضمّ الأمور التي تؤثر على قيمة فحص معامل التبديد/القدرة والتي تم تصميمها في الملحق (5-6) وكذلك الأمور التي من شأنها إحداث تغيير على قيمة المواسعة المُقاسة والتي تم تصميمها بالملحق (5-7).

10. مواطن العجز في هذا الفحص

فحص معامل التبديد/القدرة والمواسعة الخاص بالمواد العازلة ورغم إنتشاره بشكل واسع وكذلك إعتماده من قبل اللجنة الكهروتقنية الدولية (IEC) كأحد الفحوصات المصنعية الموصى بها، إلا أنه يُعاني من القصور في بعض المواطن كما هو مُبين بالنقاط التالية:

10.1 معامل التبديد/القدرة - dissipation/Power Factor DF&PF

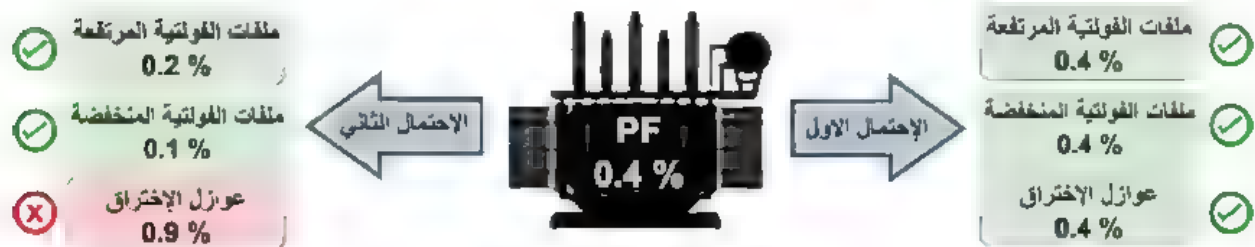
• قيمة معامل التبديد/القدرة قيمة متوسطة (Average):

عند إجراء فحص معامل القدر للمادة العازلة فإننا نقوم بقياس الحالة المتوسطة (Average condition) للمادة العازلة تحت الفحص، مما يعني وجود مشكلتين أساسيتين :

✓ **صعوبة الرؤية :** عند فحص مادة عازلة وعلى فرض أنها مُقسّمة إلى خمسة أقسام، فإن قيمة معامل القدرة لهذه المادة تُعبر عن الحالة المتوسطة (Average Condition) لهذه المادة ككل، مما يعني أنه لو كان معامل القدرة (0.2%) بالمئة للمناطق الأربعة الأولى ويساوي (1.5%)

للمنطقة رقم خمسة فإن القيمة المتوسطة لمعامل القدرة تساوي (0.46%) بالمئة وهي قيمة مقبولة نوعاً ما، لذلك لن يتم رؤية مشكلة العارلية الموحودة في المنطقة رقم خمسة من العازل ذات قيمة معامل القدرة المساوي لـ (1.5%) بالمئة.

✓ **صعوبة التمييز:** بالرجوع للمثال السابق فإن قيمة معامل القدرة الكلية المساوية لـ (0.46%) بالمئة تعني وجود احتمالين؛ **الإحتمال الأول** أن يكون العازل كله قد تقادم، أي أن المناطق الخمسة قيمة معامل القدرة لها (0.46%) بالمئة، **والإحتمال الثاني** أن منطقة واحدة فقط ضعيفة (1.5%) بالمئة و باقي المناطق وضعها سليم (0.2%) بالمئة، لذلك فإن القيمة المتوسطة لمعامل القدرة حالتها يساويين معرفة فيما إذا كانت المشكلة تخص العازل ككل أو أنها تخص منطقة محددة من العازل فقط.

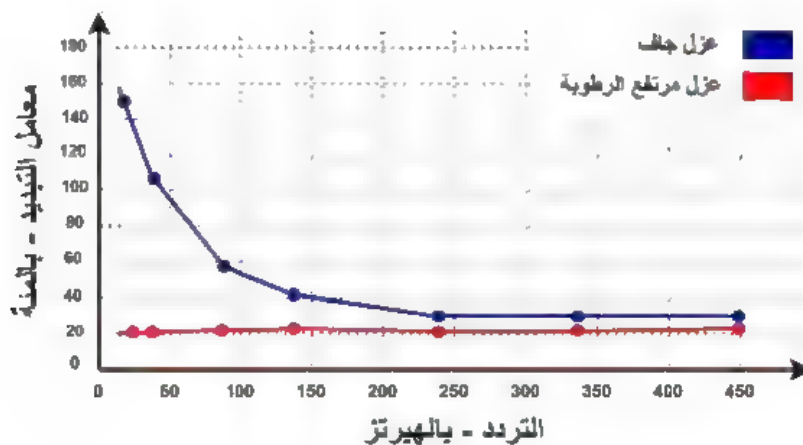


الشكل رقم (5-26)

• تردد الفحص:

في هذا الفحص يتم قياس معامل التبديد/القدرة عند التردد الإسمي للمحول، وهناك الكثير من البحوث أكدت وجود مجموعة من مشاكل العازل لا يتم كشفها إلا عند الترددات المنخفضة (15 Hz) أو الترددات المرتفعة (400 Hz)، وأن المنطقة الأقل حساسية هي منطقة التردد الإسمي (50/60Hz) ولذلك عادةً ما تُسمى بالنقطة العمياء (Blind spot).

الشكل (5-27) يُبين تأثير تردد الفحص على قيمة معامل التبديد لعوازل إختراق الفولتية المرتفعة من النوع (OIP) وفقاً لما تم نشره في بحث [CIGRE, Guide for Transformer Maintenance 445] والذي يُظهر حساسية هذا الفحص عند الترددات القليلة مما يجعله ذو كفاءة أكبر في الكشف عن المشاكل المتعلقة بالعزل.



الشكل رقم (5-27)

لذلك يُنصح بإجراء هذا الفحص عند أكثر من تردد وهو ما يُسمى بفحص (Variable Frequency Power Factor test – VFPF) وكذلك إجراء هذا الفحص أثناء عزل المحول (Offline) مما يُتيح إختيار قيمة تردد الفحص المناسبة، وهذا بدوره لا يُقلل من شأن هذا الفحص الـ (Online rated frequency PF test) ولكن يُشير إلى قلة حساسيتها وكفاءتها في الكشف عن المشاكل في المادة العازلة.

• ضرورة وجود قيمة مرجعية (نتائج فحوصات سابقة):

في حال عدم وجود قيم مرجعية فإن كفاءة تحليل نتائج هذا الفحص وإحتمالية الكشف عن وجود الأعطال في المادة العازلة تقل، فإن أهمية وجود القيم المرجعية تكمن في القدرة على المقارنة وتتبع تقدم المادة العازلة والكشف عن أية مشاكل أخرى قد تلحق بالمادة العازلة كارتفاع نسبة الرطوبة أو وجود أضرار فيزيائية لحقت بهذه المادة العازلة.

10.2 المواسعة الكهربائية – Capacitance

- قيمة المواسعة الكهربائية ذات حساسية عالية لدرجة الحرارة، أي يجب مراعاة اختلاف درجات الحرارة بين القراءات السابقة والحالية عند مقارنتها وتحليلها.
- قيمة المواسعة الكهربائية حساسة بشكل كبير للتشوّه الملعات، مما يعني أن أي تغيير طفيف في قيمة المواسعة قد يعني وجود تعيّر فيزيائي كبير للمادة العازلة لذلك يجب أخذه بعين الإعتبار وعدم إهماله.
- ضرورة وجود قيمة مرجعية (نتائج فحوصات سابقة أو قيم مُثبتة على لوحة البيانات لغايات المقارنة).

11. فحوصات إضافية داخمة

تُعتبر المحولات من المُعدات ذات الأهمية القصوى في المنظومة الكهربائية لما لها من دور في ديمومة سريان التيار الكهربائي عن طريق ربط عناصر المنظومة الكهربائية جميعها بالإضافة إلى تكلفتها المادية المرتفعة، لذلك لا يُمكن الإعتماد على فشل فحص واحد لتقييم حالة المحول والبدء بعمل الإجراءات التصحيحية لهذا المحول، بل يجب عمل فحوصات أخرى من شأنها تأكيد ما تم الكشف عنه في هذا الفحص وتحديد نوع العُطل بالضبط ثم بعد ذلك يُصار لعمل الإجراءات التصحيحية اللازم لهذا المحول والذي قد يتطلب التواصل مع مُصنّع هذا المحول.

فعند إجراء فحص معامل التنديد/القدرة و المواسعة (Capacitance و DF/PF) وكانت نتائج الفحص غير مُرضية، فإنه يجب إعادة الفحص بعد التأكد من جميع خطوات الفحص ومراعاة تحنّب الأمور التي قد تؤثر على نتيجة هذا الفحص، وفيما يُخصّ عوازل الإختراق فكما ورد في المعيار الصادر عن اللجنة الكهروتقنية الدولية [IEC, 60137-2017] فإن يجب الإنتظار لمدة ساعة قبل إعادة الفحص مع ضرورة تسجيل درجة الحرارة. وفي حال الحصول على نتيجة أخرى غير مُرضية، لا يُصبح بوضع المحول بالخدمة قبل عمل تفقد داخلي بالإضافة إلى عمل الإجراءات التصحيحية اللازمة ولكن لا تُد من إجراء بعض الفحوصات الأخرى للتأكد من وجود هذه الأعطال قبل البدء بالإجراءات التصحيحية ومنها كالآتي:

● معامل التبديد/القدرة

- فحص معامل القدرة بتردد متغير (Variable Frequency Power Factor - VFPP)
- فحص معامل القدرة بفولتية متدرجة (Stepped Voltage Power Factor or PF Tip- (Up

- فحص الإستجابة الترددية للمادة العازلة (Dielectric Frequency Response - DFR)
- فحص الغازات الذائبة في الزيت (Dissolved Gas Analysis - DGA)

● المواسعة

- فحص مُفاعلة التسرب (Leakage Reactance)
- فحص تحليل الإستجابة الترددية القسحي (Frequency Response Analysis FRA)

12. أمثلة على نتائج فحوصات مَصْنَعِيَّة

12.1 المثال الأول: الشكل (5-28) يُبين قِيَم فحص معامل التديد/القدرة والمواسعة مَصْنَعِي (FAT) لمحول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (Three Phase Two Winding) موصول بطريقة (YNd11) ذو مُغَيِّر خطوة من نوع (DETC or OCTC).

Acceptance Test Certificate															
Customer					A.C. INSULATION TESTS								Page No		
					Standard EC 60076-1(10.1.3b) &)								Serial No		
Rated Power (MVA)					100 / 135								Report No		
Object temperature					27 °C								vector Group YNd11		
Weather					Relative humidity 56 %								Ambient temperature 23 °C		
					Rated frequency 50 Hz								Test Frequency 50 Hz		
OVERALL TESTS															
Measurements					Equivalent 10 kV readings								Power factor (%)		Capacitance (pF)
Test No	Energized	Grounded	Guarded	Test voltage (kV)	Current measurement				Loss measurement				Measured	20°C	
					Reading	Reading	Multiplier	mA	Reading	Reading	Multiplier	Watt			
1	HV	LV		10	38	38	1	38	4	4	0.2	0.8	0.22	0.18	$C_{HV} \cdot C_{LV} = 11791$
2	HV		LV	10	85	85	0.2	17	3	3	0.1	0.3	0.19	0.13	$C_{LV} = 5481$
3	LV	HV		10	76	76	1	76	8	8	0.2	1.7	0.22	0.18	$C + C_{LV} = 24591$
4	LV		HV	10	56	56	1	56	8	8	0.2	1.2	0.22	0.16	$C_L = 18271$
5	HV	LV-UST		10	98	98	0.2	19	4	4	0.1	0.4	0.22	0.16	$C_{LV} = 6321$
6	HV	LV cable Ground		10	74	74	1	74	8	8	0.2	1.6	0.21	0.15	$C_{LV} \cdot C_L = 23761$
BUSHING TESTS															
Measurements				Equivalent 10 kV readings								Power factor (%)		Capacitance (pF)	
Phases	Serial No		Test voltage (kV)	Current measurement				Loss measurement				Measured	20°C		
				Reading	Reading	Multiplier	mA	Reading	Reading	Multiplier	Watt				
H1			10	90	90	0.02	1.81	7	8	0.01	0.086	0.36		$C1 = 581$	
H2			10	91	91	0.02	1.82	7	8	0.01	0.077	0.38		$C1 = 580$	
H3			10	90	90	0.02	1.80	7	8	0.01	0.077	0.38		$C1 = 578$	
L-O			10	66	66	10	0.6	15	15	0.002	0.031	0.47		$C1 = 215$	
X1			10	60	60	0.02	1.21	3	3	0.01	0.032	0.26		$C1 = 385$	
X2			10	62	62	0.02	1.24	3	3	0.01	0.037	0.30		$C1 = 383$	
X3			10	61	61	0.02	1.22	3	3	0.01	0.037	0.30		$C1 = 382$	

الشكل رقم (5-28)

12.2 المثال الثاني: الشكل (5-29) يُبين قِيم فحص معامل التبديد/القدرة والمواسعة قصني (FAT) لمحول ثلاثي الأطوار ثلاثي الملفات (Three Phase Tertiary Winding) موصول بطريقة (YNd11-d11) ذو مُغَيِّر خطوة من نوع (OLTC)

Measurement of (tan δ) dissipation factor of the insulation system capacitances					
Relative humidity (%):		Voltage type: p.u. or SMV:		Temperature (°C):	
Measured sequence and data between each winding to earth					
Tested winding	Earthing parts	Test voltage (kV)	Capacitance value (pF)	Dielectric dissipation factor tan δ at 20°C (%)	Test method
11V	Other winding, case frame and tank enclosure	10	10990	0.25	Method of opposite wiring
1V1		10	12280	0.27	
1V2		10	11780	0.25	
11V + 1V1		10	18570	0.28	
11V + 1V1 + 1V2		10	24210	0.29	
Measured sequence and data between windings					
1V1 to 1V2	Other winding, case frame and tank enclosure	10	2325	0.23	Method of positive wiring
11V to 1V2		10	2280	0.21	
1V1 to 1V2		10	8077	0.24	
Test results	The measured value of dissipation factor meet the relevant requirements				

الشكل رقم (5-29)

الملحق (5-1)

تنويه

يضم هذا الملحق خطوات الفحص وتوصيلاته بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسّط. إستناداً على الخبرة بالتعامل مع هذه الأجهزة، وتُجدر الإشارة أنه في حال إستخدام جهاز الفحص المُشار إليه في هذا الملحق لا يجب الإعتماد على هذا الملحق فقط، بل يجب قراءة الكُتيبات التفصيلية الخاصة بهذا الجهاز والمزودة بواسطة الشركة المُصنعة للجهاز جيداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية و السلامة العامة

فحص معامل التبديد/القدرة والمواسعة بإستخدام جهاز DELTA2000 10kV by MEGGER



الشكل رقم (5-1-1)

• مواصفات الجهاز: حسب ال(DELTA2000 manual)

- فولتية المدخل الاسمية : 230 V, 50 Hz
- نطاق فولتية المخرج : 0 إلى 12kV
- نطاق القياسات : حسب الجدول التالي.

الجدول رقم (1-1-5)

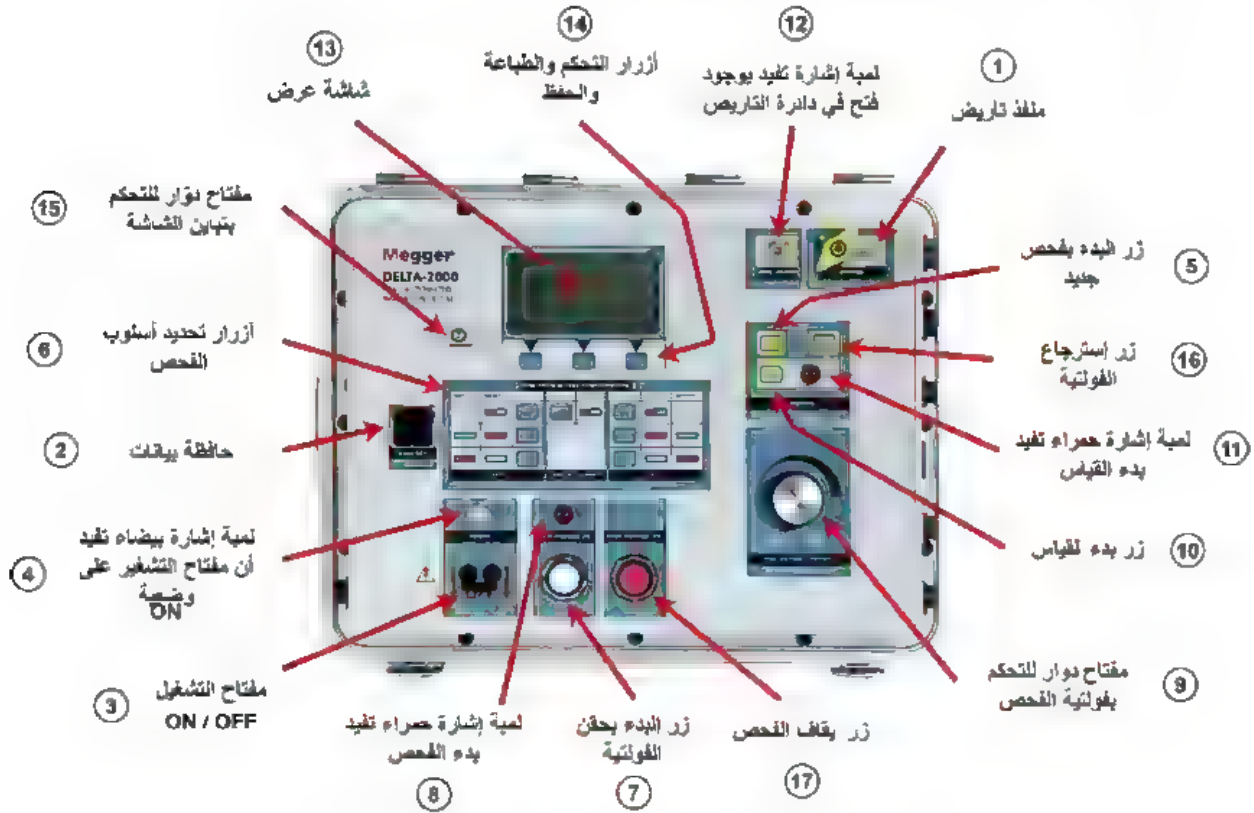
القيمة المُقاسة	النطاق (Range)	درجة الوضوح (Resolution)	الدقة (Accuracy)
الفولتية	250 V – 12 kV	10 V	$\pm(1\% \text{ of reading} + 1 \text{ digit})$
التيار	0 – 5 A	1 μ A	$\pm(1\% \text{ of reading} + 1 \text{ digit})$
المواسعة	1 pF – 1.1 μ F	0.01 pF	$\pm(0.5\% \text{ of reading} + 2 \text{ pF})$ UST $\pm(0.5\% \text{ of reading} + 6 \text{ pF})$ GST
معامل التنديد	0 – 200%	0.01%	$\pm(2\% \text{ of reading} + 0.05\% \text{ DF})$
معامل القدرة	0 – 90%	0.01%	$\pm(2\% \text{ of reading} + 0.05\% \text{ PF})$
حسائر القدرة	0 – 2 kW	0.1 mW	$\pm(2\% \text{ of reading} + 1 \text{ mW})$

- البيئة التشغيلية المحيطة : 32° F to 122° F (0° C to 50° C) RH to 90%, Non condensing
- البيئة التخزينية المحيطة : -58° F to 140° F (-50° C to 50° C) RH to 95%, Non condensing
- أبعاد وحدة التحكم : 381 x 559 x 406 mm
- أبعاد وحدة الفولتية المرتفعة : 381 x 559 x 406 mm
- وزن وحدة التحكم : 74 lb. (33 kg)
- وزن وحدة الفولتية المرتفعة : 63 lb. (29 kg)

• خطوات الفحص بواسطة هذا الجهاز:

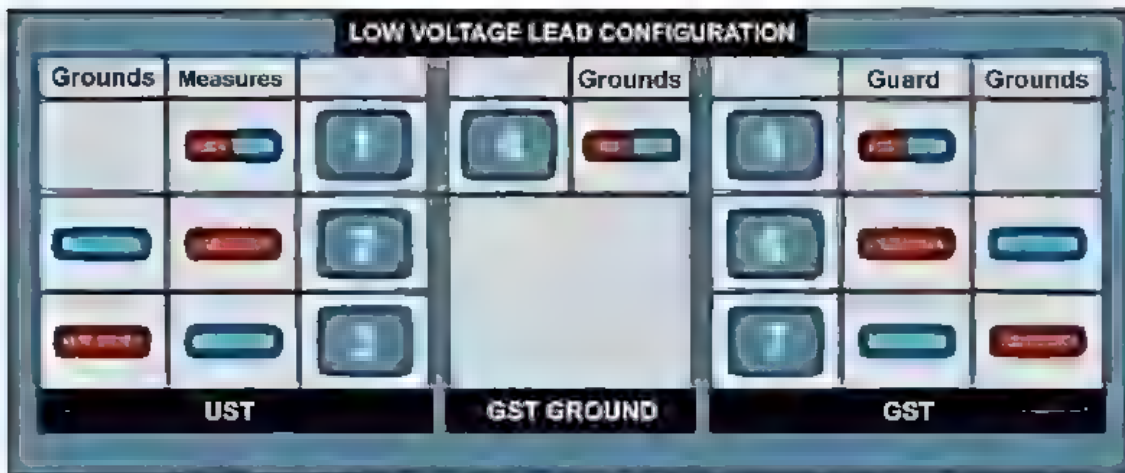
1. التأكد من تطبيق الخطوات (6.1 إلى 6.8) الواردة في فقرة خطوات الفحص من فصل فحص معامل التبديد/القدرة والمواسعة
2. التأكد من أن الدائرة المراد فحصها غير مكهربة وعدم وجود احتمالية لكهربتها أثناء الفحص
3. تجنب لمس دائرة الفحص أثناء إجراء الفحص أو بعده، إلا بعد التأكد من عدم وجود فولتية وأن الملفات تم تفريغها تماماً من الشحنات المخزنة.
4. التأكد من أن أسلاك التوصيل الخاصة بجهاز الفحص (Test leads) وكذلك المشابك الخاصة بها (Clamps) في حالة جيدة وغير مُتسحة ولا تُعاني من أية أضرار فيزيائية كالشقوق أو الكسور
5. التأكد من أن جهاز الفحص المراد استخدامه مُعاير (Calibrated)، مع مراعاة عدم استخدام الجهاز في الأجواء القابلة للإنفجار وكذلك الأجواء الماطرة وفي حال تساقط الثلوج أيضاً.
6. قبل البدء بالفحص يُفضل التعرف على أجزاء جهاز الفحص من شاشة ومنفذ وأزرار ومفاتيح تحكم وللمبات إشارة كالآتي:

الشكل (5-1-2) التالي يُبين الأجزاء الرئيسية لواجهة وحدة التحكم.



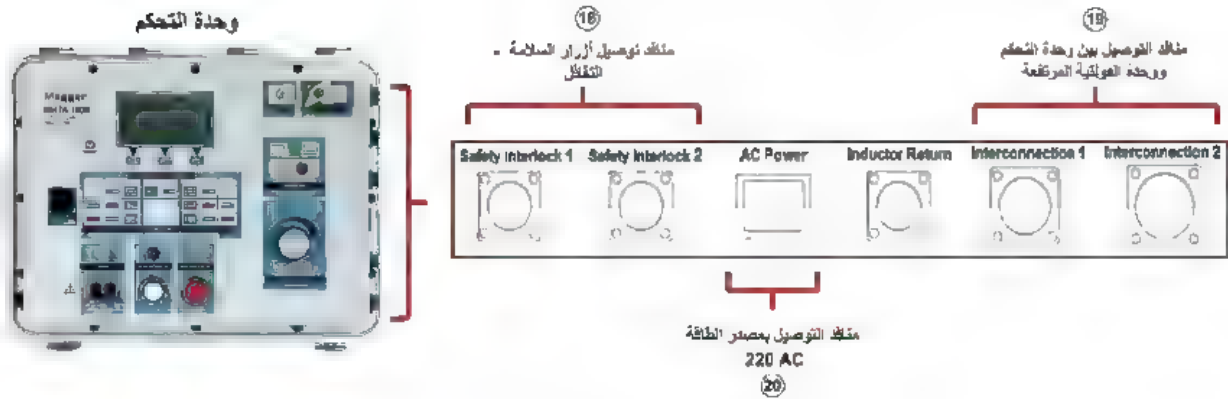
الشكل رقم (5-1-2)

الشكل (5-1-3) يُبين أزرار تحديد أسلوب الفحص الموحدة على وحدة التحكم



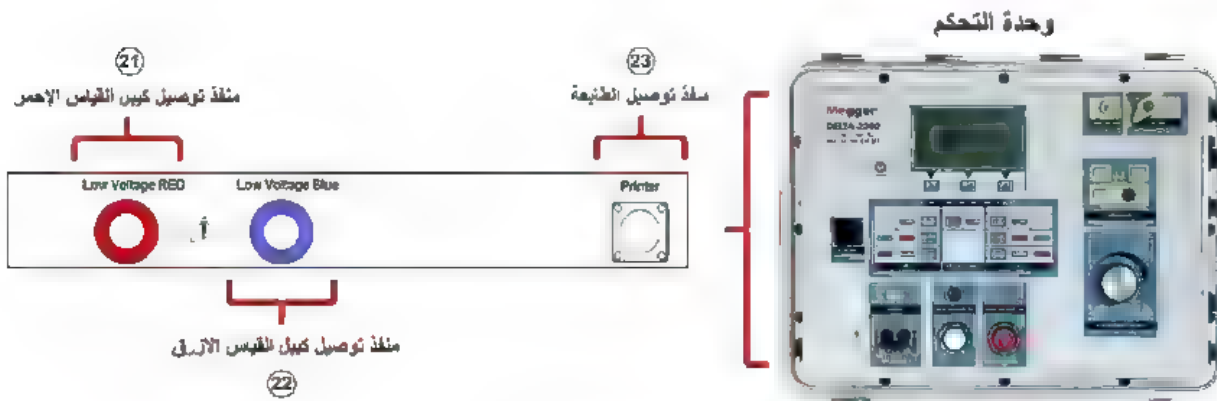
الشكل رقم (5-1-3)

الشكل (5-1-4) يُبين المنافذ الموجودة على يمين وحدة التحكم.



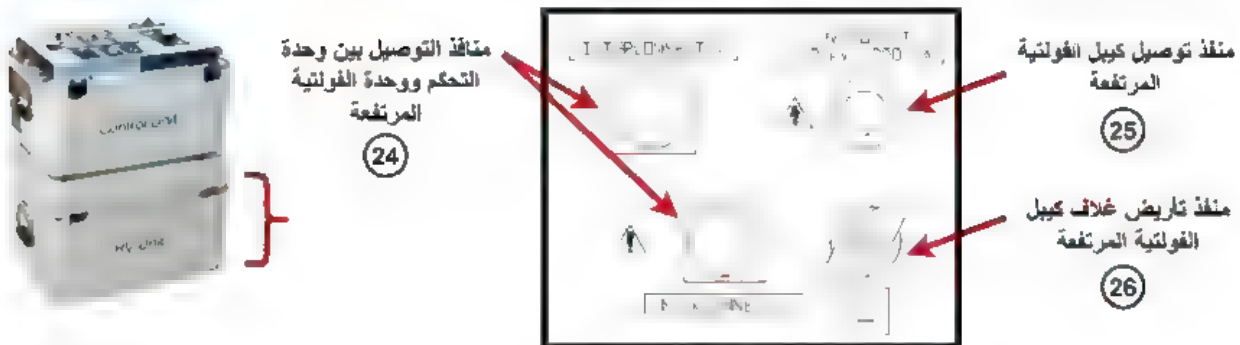
الشكل رقم (5-1-4)

الشكل (5-1-5) يُبين المنافذ الموجودة على يسار وحدة التحكم.



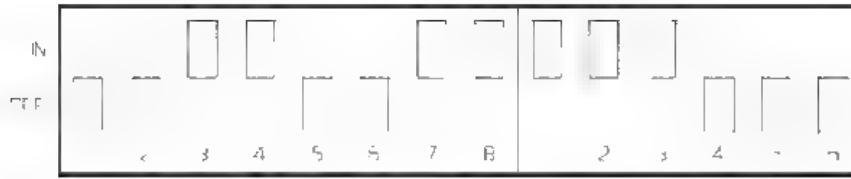
الشكل رقم (5-1-5)

الشكل (5-1-6) يبين المنافذ الموجودة على يمين وحدة الفولتية المرتفعة.



الشكل رقم (5-1-6)

7. تهيئة منطقة الفحص عبر مُراعاة الأمور التالية:
 - 7.1 التأكد من أن منطقة الفحص جافة قدر الإمكان.
 - 7.2 التأكد من عدم وجود مواد قابلة للإشتعال في منطقة الفحص.
 - 7.3 التأكد من التهوية الجيدة لمنطقة الفحص فيما إذا كانت مُغلقة.
 - 7.4 مراعاة أن يكون سطح الفحص مستوي قدر الإمكان.
 - 7.5 التأكد من سلامة نظام التأريض في منطقة الفحص.
 - 7.6 وضع حواجز حول منطقة الفحص وشواخص تُفيد بوجود فحص ذو فولتية حَظَرَة
- 8 إحضار جهاز الفحص (DELTA2000) إلى الموقع مع مراعاة وضع الجهاز على مسافة لا تقلّ عن (1.8 m) عن المحول بالظل وعدم تعريضه لأشعة الشمس المباشرة لوقت طويل، حيث أن الحرارة التشغيلية للجهاز يجب ألا تزيد عن (50°) درجة مئوية، وكذلك مُراعاة حفاف أجزاء الجهاز جميعها قبل تشغيله.
9. التأكد من أن مفتاح التشغيل الحاص بجهاز الفحص رقم (3) في الشكل (5-1-2) على وضعية (OFF 0 -) الموضحة على المفتاح.
- 10 وصل وحدة التحكم بالأرض (Local station earth) عبر منعذ التأريض رقم (1) في الشكل (5-1-2) بواسطة الكيبل المُورّد مع الجهاز من قِتل الشركة المُصنّعة (4.5m) متر، مع مُراعاة أن يكون كيبل التأريض أول كيبل يتم وصله قبل الفحص وآخر كيبل يتم إزالته عن الجهاز بعد الفحص.
11. التأكد من أن حزان المحول موصول بالأرض (Local station earth) عبر مسار تأريض ذو مُعاوقة قليلة (Low Impedance)، مع مراعاة تأريض جهاز الفحص وخزان المحول من نفس نقطة التأريض.
12. توصيل كوابل الفحص وملحقات جهاز الفحص عبر المنافذ الخاصة بها كآلاتي، مع مراعاة التأكد من أنها مُحكمة التركيب على جهاز الفحص وأنها مقفلة (Locked):
 - 12.1 توصيل كابلين (2 cables x 1.52m) على المنافذ رقم (19) المُبينة في الشكل (5-1-4) يمين وحدة التحكم والمنافذ رقم (24) يمين وحدة الفولتية المرتفعة المُبينة في الشكل (5-2-6) تبعاً للتسمية على الجهاز (Interconnection 1 & 2)، وذلك للربط بين وحدة التحكم ووحدة الفولتية المرتفعة.
 - 12.2 توصيل كيبل الفولتية المنخفضة الأحمر (كيبل القياس) على المنفذ رقم (21) على وحدة التحكم المبين في الشكل (5-1-5) على يسار وحدة التحكم.
 - 12.3 توصيل كيبل الفولتية المنخفضة الأزرق (كيبل القياس) في حال أردنا إستخدامه على المنفذ رقم (22) المبين في الشكل (5-1-5) على يسار وحدة التحكم.
 - 12.4 توصيل أسلاك أضرار السلامة أو كما يُسمى بنظام التقافل (Interlock) على المنافذ رقم (18) المُبينة في الشكل (5-1-4) يمين وحدة التحكم.
 - 12.5 توصيل الطابعة بجهاز الفحص عبر المنفذ رقم (23) المبين في الشكل (5-1-5) يسار وحدة التحكم، مع مراعاة وضعية معاتيح التبديل الثنائي (Dip switch) كما هو موضح بالشكل (5-1-7).



الشكل رقم (5-1-7)

12.6 توصيل كابل الفولتية المرتفعة (الأسود) بالمنفذ رقم (25) المبين في الشكل (5-1-6) يمين وحدة الفولتية المرتفعة، مع مراعاة توصيل العلاف الخارجي لهذا الكابل (Sheath) مع الأرض عبر المنفذ رقم (26) المبين في الشكل (5-1-6) يمين وحدة الفولتية المرتفعة.

13 التأكد من أن كابل الأرضي لمصدر الطاقة الكهربائي الخاص بجهاز الفحص موصول بالأرض (Local station earth) بمعاوقة قليلة (Low Impedance).

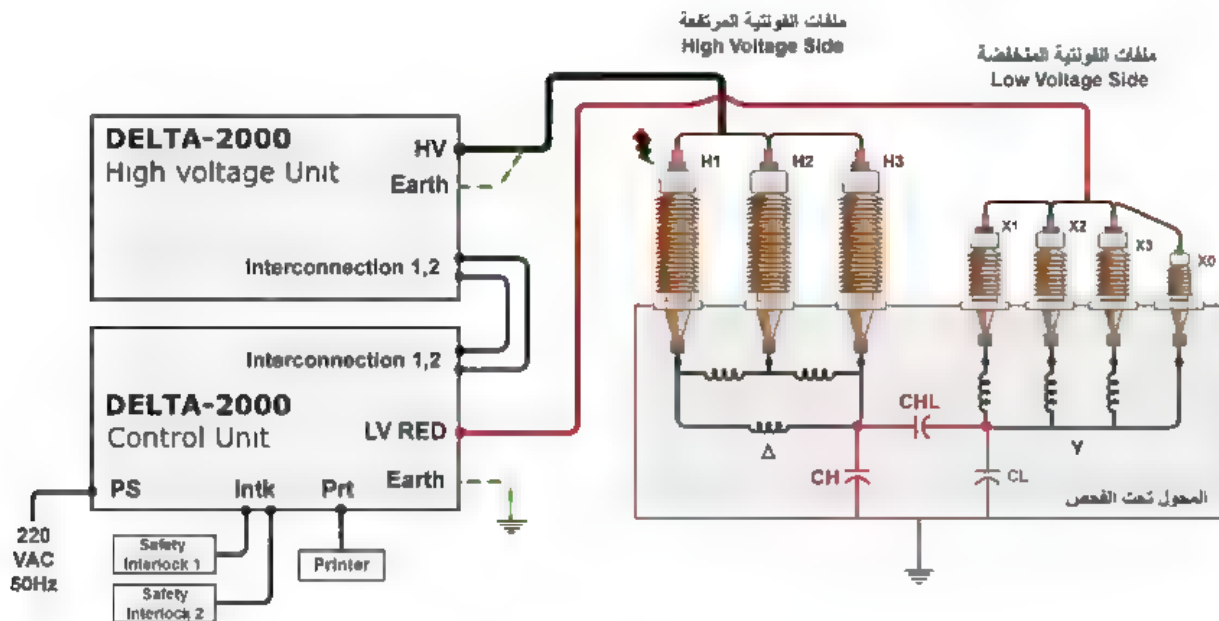
14 توصيل جهاز الفحص بمصدر الطاقة الكهربائية عبر المنفذ رقم (20) في الشكل (5-1-4) بحيث يتم وصل كابل الطاقة بجهاز الفحص أولاً ومن ثم بالمصدر الكهربائي.

15 توصيل أسلاك الجهاز بالمحول على النحو التالي:

15.1 لفحص محول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (Three phase two winding) فإنه يمكن توصيل جهاز الفحص بالمحول بطريقتين:

• الطريقة الأولى

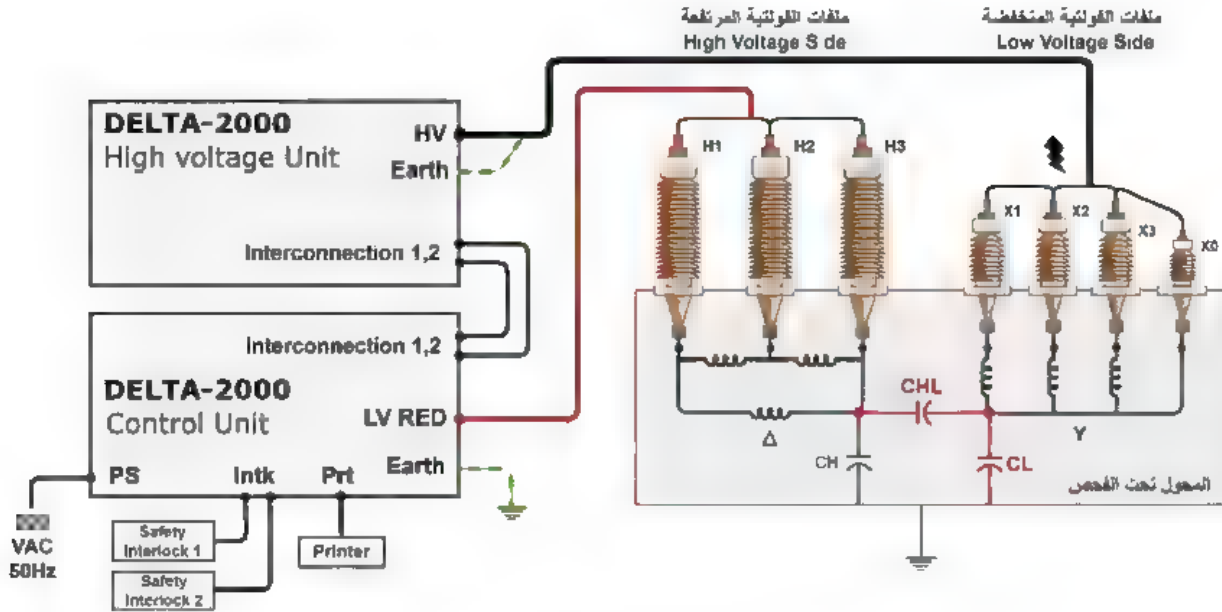
بواسطة هذه التوصيلة المبينة في الشكل (5-1-8) يمكن قياس مُركبات العزل التالية (CHL) و (CH) و (CHL+CH).



الشكل رقم (5-1-8)

• الطريقة الثانية

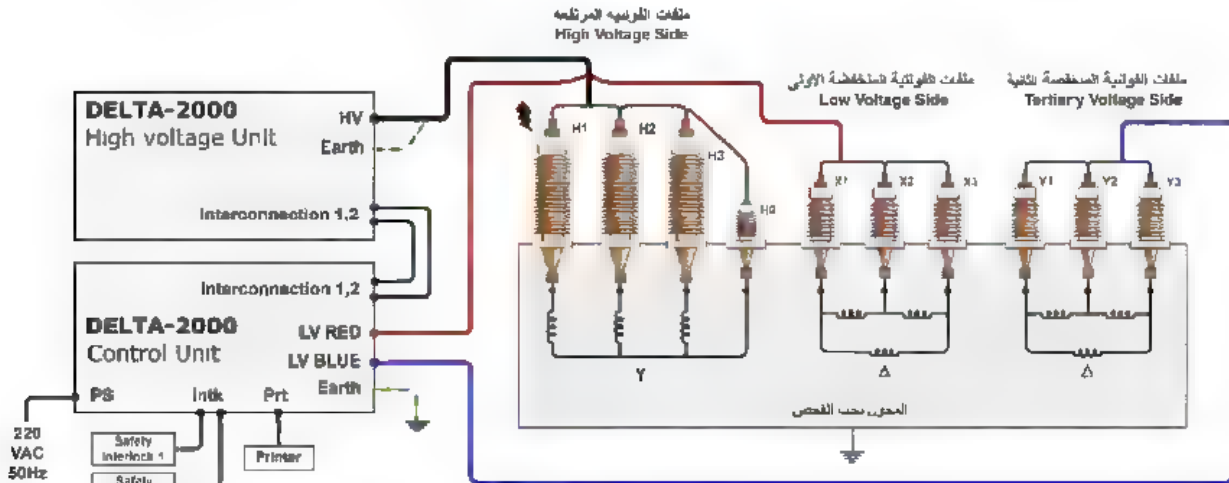
بواسطة هذه التوصيلة المُبينة في الشكل (5-1-9) يُمكن قياس مُركّبات العزل التالية (CHL) و (CL) و (CHL+CL).



الشكل رقم (5-1-9)

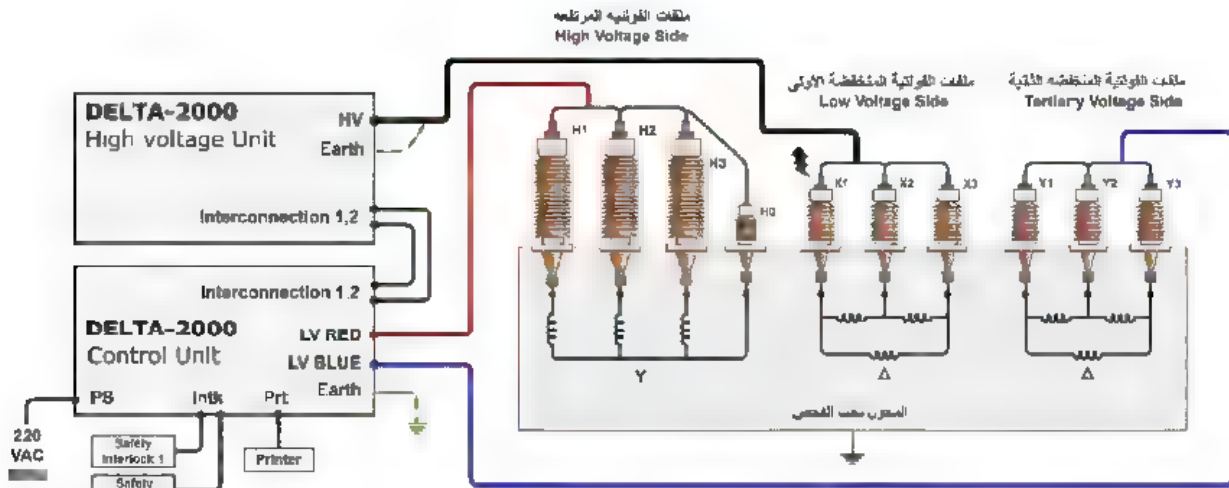
15.2 لفحص محول ثلاثي الأطوار ثلاثي الملفات (Three phase tertiary winding) فإنه يُمكن توصيل جهاز الفحص بالمحول بثلاث طُرق:

• الطريقة الأولى



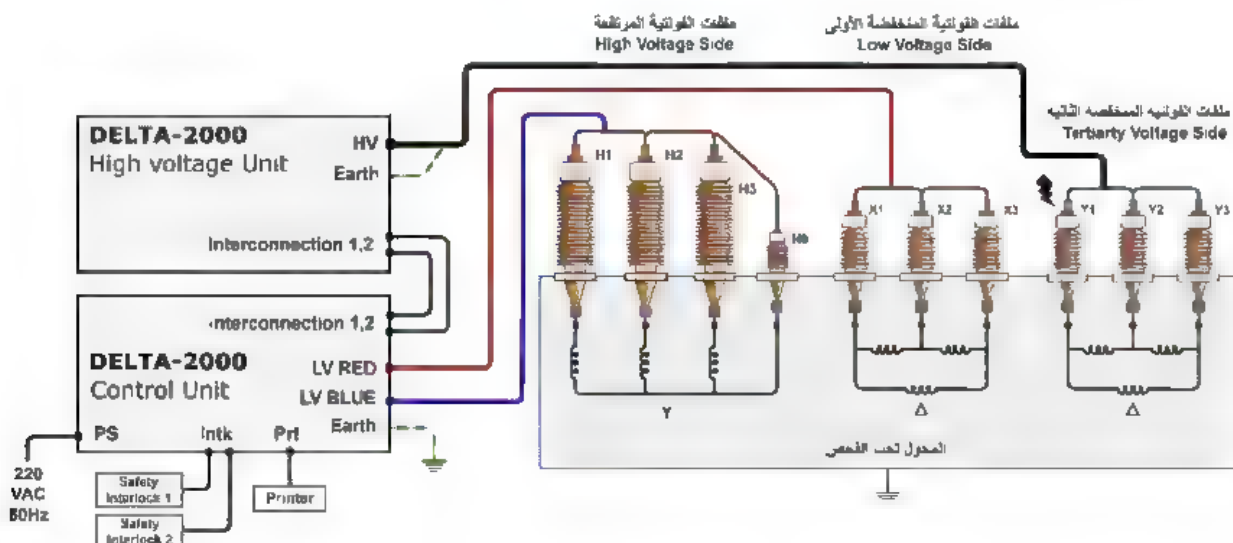
الشكل رقم (5-1-10)

• الطريقة الثانية



الشكل رقم (5-11)

• الطريقة الثالثة

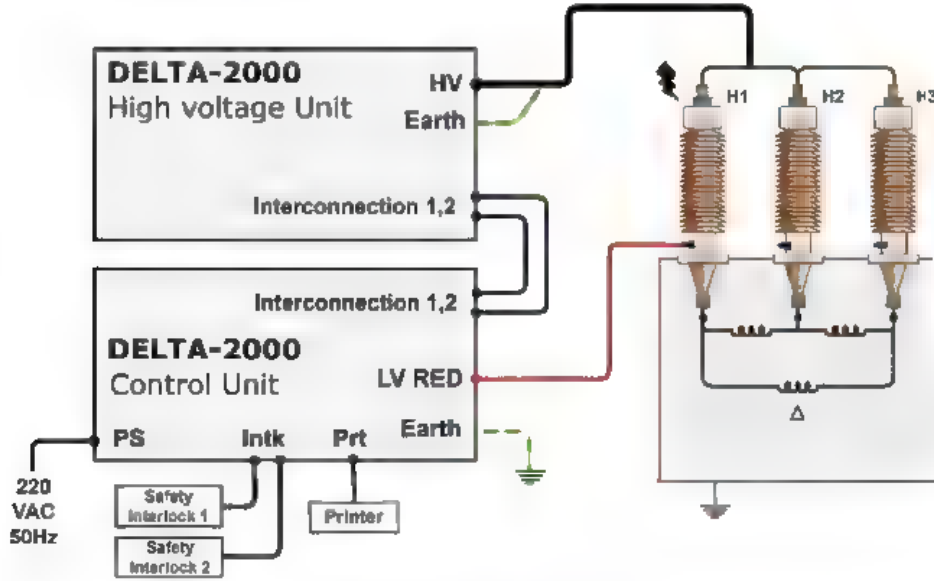


الشكل رقم (5-12)

15.3 لفحص عوازل إحتراق الفولتية المرتفعة (HV bushings) يتم عمل واحدة من التوصيلات التالية:

- الطريقة الأولى

بواسطة التوصيلة المبينة في الشكل (5-1-13) يُمكن فحص العزل الرئيسي لعازل الإحتراق (C1).

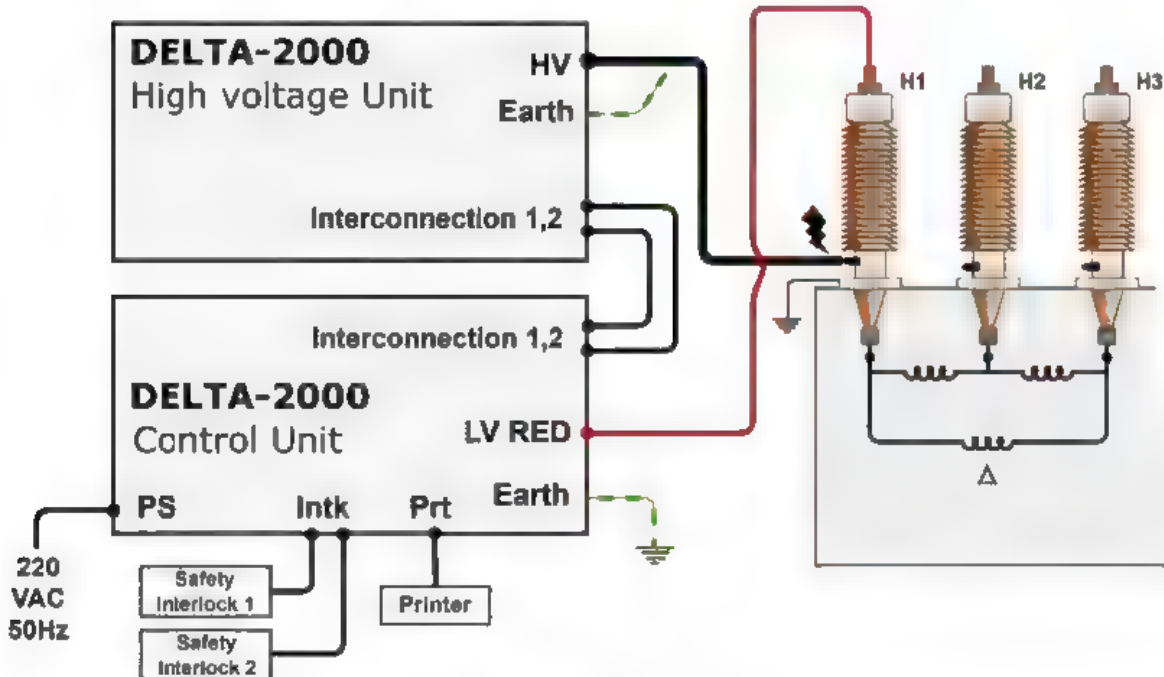


الشكل رقم (5-1-13)

في التوصيلة السابقة يتم مراعاة تأريض ملفات الفولتية المنخفضة المقصورة.

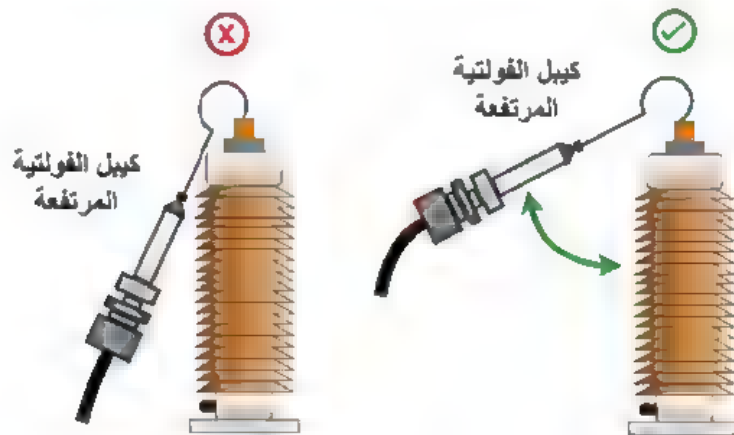
- الطريقة الثانية

بواسطة التوصيلة المبينة في الشكل (5-1-14) يُمكن فحص عزل مأخذ الفحص (C2).



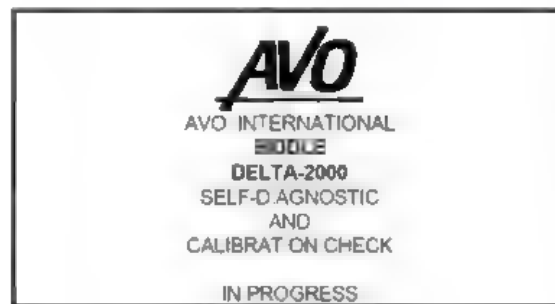
الشكل رقم (5-1-14)

الشكل (5-1-15) يوضح وضعية كابل الفولتية المرتفعة الصحيحة والخاطئة عند وصله بعوازل إحترق المحول.



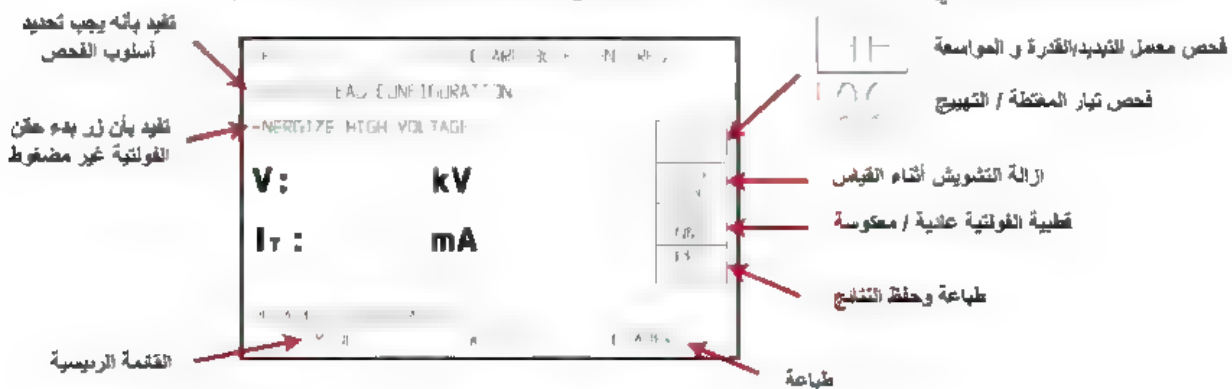
الشكل رقم (5-1-15)

16 بعد عمل توصيلة الفحص المناسبة نقوم بتشغيل جهاز العحص عن طريق تغيير وضعية (رفع) مفتاح التشغيل رقم (3) المبين في الشكل (5-1-2) وملاحظة إنارة لمبة الإشارة بيضاء اللون رقم (4) المبيّنة في ذات الشكل. لتظهر لنا الشاشة الإفتتاحية ويبدء إختبار التشخيصي الذاتي للجهاز كما هو مبين بالشكل (5-1-15).



الشكل رقم (5-1-16)

17 بعد نجاح الإختبار التشخيصي الذاتي للجهاز وعدم إيجاد أية أخطاء يقوم الجهاز بالانتقال لشاشة الفحص الرئيسية والتي من خلالها يُمكن معرفة المعلومات المبيّنة بالشكل (5-1-17).



الشكل رقم (5-1-17)

يُمكن ضبط تباين الشاشة (Contrast) بواسطة المفتاح الدوّار رقم (15) المبين في الشكل (5-1-2).

18. من شاشة الفحص السابقة يُمكن ملاحظة المربعات على يمين الشاشة والتي تُشير لبعض إعدادات الجهاز بشكل مختصر فيما إذا كانت مناسبة أو لا، وفي حال أردنا ضبط إعدادات الجهاز والفحص نقوم باختيار القائمة الرئيسية (MENU) المُبينة في الشكل (5-1-17) وذلك بالضغط على الزر أسفلها، لننتقل للشاشة المبينة في الشكل (5-1-18) والتي من خلالها يُمكن ضبط إعدادات الفحص والجهاز كالآتي باستخدام الأزرار الثلاثة أسفل شاشة العرض:

18.1 تحديد نوع القياسات (Measurement) فيما إذا كان فحص العازل (AC Insulation test) وهو ما يحب إختياره هبأ، أو إختيار فحص تيار المغنطة / التهييج (XFMR Excitation current test) وهو فحص آخر سيتم التطرق له في الفصل التالي.

18.2 تحديد قيمة فولتية التصحيح (Correction) بإختيار (10kV) أو (2.5kV) كيلوفولت أو إلغاء التصحيح (None).

18.3 تحديد نوع نتيجة الفحص المعروضة على الشاشة (Loss Display)، بحيث يُمكن إختيار أن تكون النتيجة كعامل تبديد (Dissipation Factor - DF) أو معامل قدرة (Power Factor - PF).

18.4 تشغيل أو إيقاف إرالة التشويش (Interference Suppressor) وذلك بإختيار تشغيل (ON) إذا كانت منطقة الفحص عُرضة للتشويش كفحص المحولات في محطات التحويل المُكهرية (Energized) مرتفعة الفولتية.

18.5 تحديد قُطبية فولتية الفحص المُطبقة (HV Polarity) فيما إذا كانت عادية (Normal) أو عادية ومعكوسة (Normal/Reverse) وذلك للتخلص من تأثير تيارات التشويش الكهروستاتيكية الناتجة عادةً من محطات التحويل المجاورة ذات الفولتية المنخفضة.

بالإضافة إلى مجموعة من الإعدادات الأخرى الخاصة بطباعة وحفظ النتائج و ضبط الوقت ومعايرة الجهاز وغيرها من الإعدادات.

EXIT TO TEST	11/26/96	10:27
MEASUREMENT:	AC INSULATION TEST (or) XFMR EXCITATION TEST	
CORRECTION:	NONE (or) 10 kV (or) 2.5 kV	
LOSS DISPLAY	POWER FACTOR (or) DISSIPATION FACTOR	
INTERFERENCE SUPPRESSOR	ON (or) OFF	
HV POLARITY:	NORMAL/REVERSE (or) NORMAL ONLY	
NEXT MENU		
ENTER (OR) CHANGE	UP	DOWN

الشكل رقم (5-1-18)

19. بعد الإنتهاء من ضبط إعدادات الفحص والجهاز نقوم بإختيار (EXIT TO TEST) من الشكل (5-1-18) وذلك للرجوع لشاشة الفحص الرئيسية المُبينة في الشكل (5-1-17). ومن ثم نقوم بالضغط على زر فحص جديد (New test) رقم (5) المُبين في الشكل (5-1-2).

20. إختيار أسلوب الفحص وفقاً لنوع المُعدّة فيما إذا كان محول أو عازل إختراق (Bushing) ونوع مُركبة العزل المُراد فحصها كآلاتي:

20.1 محول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (Three phase two windings)

يتم إختيار أسلوب الفحص بالإعتماد على طبيعة القيمة المُراد قياسها وفقاً للحدود (5-1-2) التالي:

الجدول رقم (5-1-2)

توصيلة الجهاز بالمحول	مركبة العزل المراد فحصه	أسلوب الفحص	Measure	Ground	Guard	رقم زر أسلوب الفحص بالرجوع للشكل (5-1-3)
الطريقة الأولى الشكل (5-1-8)	CH + CHL	GST - Ground	-	RED	-	4
	CH	GST - Guard	-	-	RED	5
	CHL	UST	RED	-	-	2
الطريقة الثانية الشكل (5-1-9)	CL + CHL	GST - Ground	-	RED	-	4
	CL	GST - Guard	-	-	RED	5

20.2 محول ثلاثي الأطوار ثلاثي الملفات (Three phase tertiary winding)

يتم إختيار أسلوب الفحص بالإعتماد على طبيعة القيمة المُراد قياسها وفقاً للحدود (5-1-3) التالي:

الجدول رقم (5-1-3)

توصيلة الجهاز بالمحول	مركبة العزل المراد فحصه	أسلوب الفحص	Measure	Ground	Guard	رقم زر أسلوب الفحص بالرجوع للشكل (5-1-3)
الطريقة الأولى الشكل (5-1-10)	CH + CHL	GST - Guard	-	RED	BLUE	7
	CH + CHT	GST - Guard	-	BLUE	RED	6
	CH	GST - Guard	-	-	RED BLUE	5
	CHL	UST	RED	BLUE	-	2
	CHT	UST	BLUE	RED	-	3
الطريقة الثانية الشكل (5-1-11)	CL + CHL	GST - Guard	-	BLUE	RED	6
	CL + CLT	GST - Guard	-	RED	BLUE	7
	CL	GST - Guard	-	-	RED BLUE	5
	CLT	UST	BLUE	RED	-	3
الطريقة الثالثة الشكل (5-1-12)	CT + CHT	GST - Guard	-	BLUE	RED	6
	CT + CLT	GST - Guard	-	RED	BLUE	7
	CT	UST	-	-	RED BLUE	1

20.3 عوازل إختراق الفولتية المرتفعة (High Voltage Bushings)

يتم إختيار أسلوب الفحص بالإعتماد على طبيعة القيمة المُراد قياسها وفقاً للجدول (5-1-4) التالي:

الجدول رقم (5-1-4)

رقم زر أسلوب الفحص حسب الشكل (5-1-3)	Guard	Ground	Measure	أسلوب الفحص	مركبة العزل المراد فحصه	توصيلة الجهاز بعازل الإختراق
2	-	-	RED	UST	C1	الطريقة الأولى الشكل (5-1-13)
5	RED	-	-	GST - Guard	C2	الطريقة الثانية الشكل (5-1-14)

21 الضغط على أزرار السلامة أو كما يُسمى بنظام التفاضل (Safety Interlock Push Buttons 1&2)

معاً و نبقيهما بهذه الحالة حتى إنتهاء الفحص كما هو مُبين بالشكل (5-1-19)، ويُنصح بأن يكون واحد من هذه الأزرار مع مشغل الجهاز والزر الثاني مع شخص آخر لزيادة السلامة في الحالات الطارئة. حيث أنه في حالات الطوارئ أثناء الفحص نوقف الضغط على هذ الأزرار لإيقاف حقن الفولتية أو نقوم بالضغط على زر إيقاف الفحص الأحمر (17) المبين في الشكل (5-1-2).



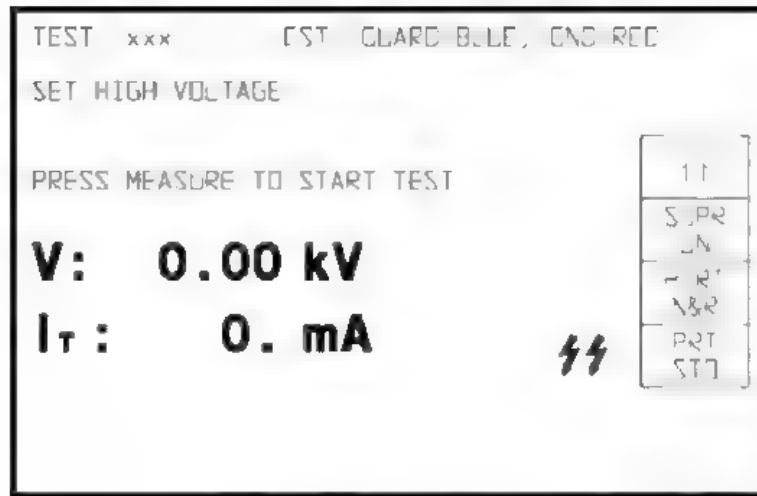
الشكل رقم (5-1-19)

22. تفسير المفتاح الدّوّار (9) المُبين في الشكل (5-1-2) أي جعله على وضعية (ZERO START).

23. الضغط على زر البدء بحقن الفولتية الأبيض (7) المُبين في الشكل (5-1-2)، وملاحظة إنبارة لمبة

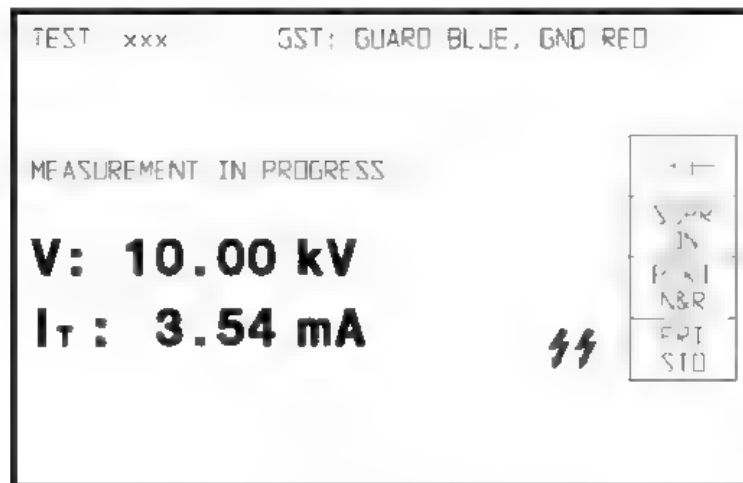
الإشارة الحمراء (8) المبيبة في الشكل (5-1-2) والتي تُفيد بدء حقن الفولتية، وكذلك ظهور إشارتي

البرق على شاشة العرض والتي أيضاً تُفيد بدء حقن الفولتية كما هو مُبين في الشكل (5-1-20)



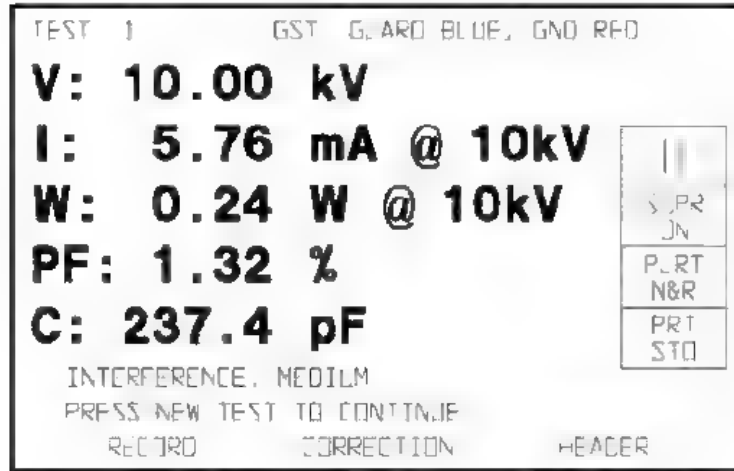
الشكل رقم (5-1-20)

24. البدء بتحريك المفتاح الدوّار (9) لرفع العولتية وثبيتها عند العولتية المُراد فحص المُعدّة عندها وفي حالتنا هذه سَنختار (10kV) كيلوفولت. (يُمكن الإعتماد على فقرة تحديد الفولتية المُضمّنة في خطوات وأساليب الفحص (6) من هذا الفصل)
25. نقوم بالضغط على زر القياس (MEASURE) رقم (10) المُبين في الشكل (5-1-2) لتظهر لنا الشاشة المُبينة في الشكل (5-1-21) وكذلك إنارة لمبة الإشارة الحمراء (11) المُبينة في الشكل (5-1-2)، والتي تُفيد بدء القياس حيث تنطفأ هذه اللمبة عند إنتهاء القياس ولكنها لا تعني عدم وجود فولتية.



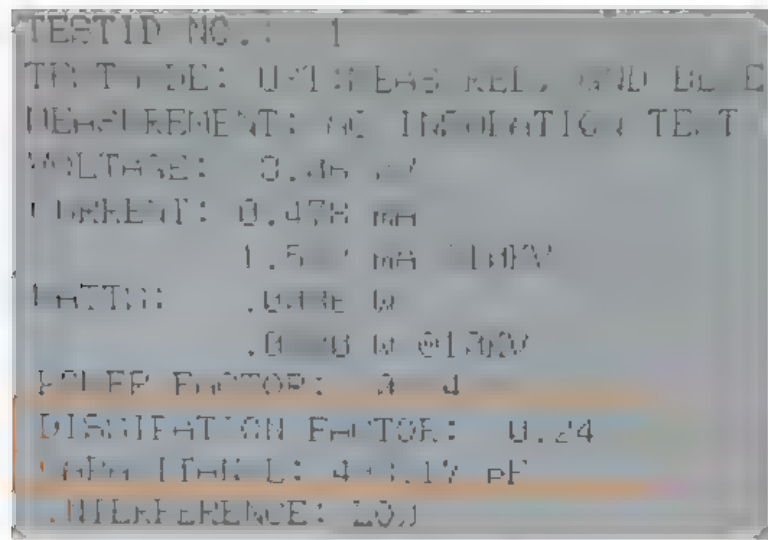
الشكل رقم (5-1-21)

26. بعد الإنتهاء من القياس تظهر نتيجة الفحص على الشاشة المُبينة في الشكل (5-1-22) حيث يُمكن الآن إيقاف الضغط على أزرار السلامة (Interlock pushbuttons 1&2).



الشكل رقم (5-1-22)

27. يُمكن طباعة النتيجة عبر الضغط على الزر أسفل كلمة (Header) الظاهرة على شاشة العرض لطباعة النتيجة وحفظها، ويبين الشكل (5-1-23) نتيجة فحص سابق (مطبوعة) تم إجراؤه لعارل إختراق محول من النوع (OIP Bushing 400kV) عند فولتية فحص (3kV) كيلوفولت وأيضاً تظهر نتيجة الفحص مُصححة لـ (10kV) كيلوفولت.



الشكل رقم (5-1-23)

28. بعد ذلك يُمكن الضغط على زر إيقاف الفحص الأحمر (17) المُبين في الشكل (5-1-2)، وكذلك تغيير وضعية المفتاح الدوّار (9) إلى الصفر في حال أردنا إنهاء الفحص، ولكن إذا أردنا إجراء فحص آخر يُمكن الضغط على زر فحص جديد (5) المُبين في الشكل (5-1-2) وإعادة الخطوات من الخطوة (19) إلى آخر الخطوات.

الملحق (2-5)

إختيار فولتية الفحص المناسبة

في هذا الباب وردت الكثير من المقترحات والتي سيتم ذكرها وفقاً للمرجع المضمنة فيه:

✓ معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE)

وفقاً للمعيار الصادر عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Std C57.12.90-2015]، فإن فولتية الفحص يجب ألا تزيد عن فولتية التحمل (Withstand voltage) للملفات أو نصف قيمة فولتية الفحص منخفضة التردد الواردة بالجدول رقم (3 و 4) بالمعيار [IEEE Std C57.12.00-2015] والمرفقة في الملحق رقم (3-5) أو ألا تزيد عن (10kV) أيهما أقل.

✓ اللجنة الكهروتقنية الدولية (IEC)

وفقاً للمعيار الصادر عن اللجنة الكهروتقنية الدولية [IEC, 60137-2017]، فإن الفولتية المقترحة لإجراء هذا الفحص لعوازل إختراق المحولات (Bushings) العاملة بالموقع بشكل عام، يجب أن يكون محصور بين (2kV) كيلو فولت و (20kV) كيلو فولت.

✓ النشرة التقنية الصادرة عن شركة (ABB)

عند إجراء هذا الفحص على عوارل الإختراق (Bushings) بتطبيق الفولتية على الموصل الوسطي أي عند فحص العزل الرئيسي لعازل الإختراق (C1) بالأسلوب الموضح في الشكل [(5-19) (أ)] فإن الفولتية الموصى بها هي (10kV) كيلو فولت، أما في حال تطبيق هذا الفحص على عوازل الإختراق (Bushings) بالأسلوب الموضح في الشكل [(5-19) (ب)] أي بتطبيق الفولتية على مأخذ الفحص (Test Tap)، فإن أقصى فولتية هي (500V) فولت في حال كان مأخذ الفحص (Test Tap) مفحوص مصنعياً عند (2kV) كيلو فولت، وفي حال كان مأخذ الفحص (Test Tap) مفحوص مصنعياً عند (20kV) كيلو فولت فإنه يُمكن تطبيق فولتية فحص قد تصل لـ (5kV) كيلو فولت كما ورد بالنشرة التقنية الصادرة عن الشركة [ABB, Bushing diagnostics and conditioning, 2750 515-142 en, Rev.1]

✓ النشرة التقنية الصادرة عن (USBR)

أوردت هذه النشرة [USBR, Testing and Maintenance of High-Voltage Bushings Vol 3-2] مجموعة من القيم المقترحة لفولتية الفحص في حال تطبيق هذا الفحص على عوازل الإختراق (Bushings) بالأسلوب الموضح في الشكل [(5-19) (ب)]، أي بتطبيق الفولتية على مأخذ الفحص (Test Tap) وفقاً لنوع عازل الإختراق والشركة المصنعة كالآتي:

الجدول رقم (5-2-1)

الشركة المُصنّعة	نوع عازل الإختراق أو تصنيفه	فولتية الفحص المُقترحة بالفولت
General Electric	LC, U	2000
Lapp	POC	2000
Ohio Brass	L	250
Ohio Brass	GK, LK	500
Pennsylvania	P	500
Westinghouse	S, OS	500

✓ المرجع (Paul Gill, Electric Power Equipment Maintenance and Testing)

أورد هذا المرجع مجموعة من القيم المُقترحة لفولتية الفحص في حال تطبيق هذا الفحص على عوارل الإختراق (Bushings) بالأسلوب الموضح في الشكل [(5-19) (ب)]، أي بتطبيق الفولتية على مأخذ الفحص (Test Tap) وفقاً لمستوى فولتية عازل الإختراق (Bushing) كالآتي:

الجدول رقم (5-2-2)

فولتية عازل الإختراق بالكيلوفولت (Bushing)	فولتية الفحص المُقترحة بالفولت
أقل من 69	500
أكثر من 115	5000

✓ الكُتَيْب التفصيلي الخاص بخطوات الفحص الصادر عن شركة (Doble)

وفقاً لما ورد في الكُتَيْب التفصيلي [Doble Test Procedure, 72A-2244 Rev.A] الصادر عن شركة (Doble) عند إجراء هذا الفحص للمحولات المغمورة بالزيت فإن مستوى فولتية الفحص المُقترحة كالآتي:

الجدول رقم (5-2-3)

الفولتية الإسمية لملفات المحول بالكيلوفولت (Lint to Line KV)	فولتية الفحص المُقترحة بالكيلوفولت (Line to Ground kV)
أكثر من أو يساوي 12	10
5.04 - 8.72	5
2.4 - 4.8	2
أقل من 2.4	1

عند إجراء هذا الفحص على عوارل الإختراق (Bushings) بتطبيق الفولتية على الموصل الوسطي، أي عند فحص العزل الرئيسي لعازل الإختراق (C1) بالأسلوب الموضح في الشكل [(5-19) (أ)]، فإن مستوى فولتية الفحص المُقترحة كالآتي:

الجدول رقم (5-2-4)

فولتية الفحص المُقترحة بالكيلوفولت	فولتية عازل الإختراق بالكيلوفولت (Bushing insulation class)
10	أكثر من 8.7
5	8.7
5	5
2	4.3
1	1.2

عند إجراء هذا الفحص على عوارل الإختراق (Bushings) بتطبيق الفولتية على مأخذ الفحص (Test Tap) بالأسلوب الموضح في الشكل [(5-19) (ب)]، فإن مستوى فولتية الفحص المُقترحة كالآتي:

الجدول رقم (5-2-5)

فولتية الفحص المُقترحة بالفولت	فولتية عازل الإختراق بالكيلوفولت
2000 وكحد أقصى 5000	أكثر من 69 (Voltage Tap)
500	أقل من أو يساوي 69 (Power Factor Tap)

الملحق (5-3)

فولتية التحمل للفحوصات مُخفضة التردد كما وردت بالمعيار [IEEE Std C57.12.00-2015] الصادر
عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE) لمحاولات القدرة من التصنيف الأول والثاني (Class
(I & II

Table 3—Dielectric insulation levels for distribution and Class I power transformers, voltages in kV

Maximum system voltage (kV rms)	Nominal system voltage ^{a, c} (kV rms)	Applied voltage test ^d (kV rms)			Induced voltage test ^{e, f} (phase to ground) (kV rms)	Winding line-end BIL ^{g, h} (kV crest)			Neutral BIL ^{g, h} (kV crest)	
		Delta or fully insulated wye	Grounded wye	Impedance grounded wye or grounded wye with higher BIL		Minimum	Alternates		Grounded wye	Impedance grounded wye or grounded wye with higher BIL
Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7	Col 8	Col 9	Col 10	Col 11
Distribution transformers										
1.5	1.2 ^c	10	—	10	1.4	30			30	30
3.5	2.5 ^c	15	—	15	2.9	45			45	45
6.9	5 ^c	19	—	19	5.8	60			60	60
11	8.7 ^c	26	—	26	10	75			75	75
17	15	34	—	34	17	95	110		75	75
26	25	40	—	40	29	125	150		75	95
36	34.5	50	—	50	40	125	150	200	75	125
48	46	95	—	70	53	200	250		95	150
73	69	140	—	95	80	250	350		95	200
Class I power transformers										
1.5	1.2	10	10	10	1.4	30	45		45	45
3.5	2.5	15	15	15	2.9	45	60		60	60
6.9	5	19	19	19	5.8	60	75		75	75
11	8.7	26	26	26	10	75	95		95	95
17	15	34	26	34	17	95	110		95	110
26	25	50	26	40	29	150			95	125
36	34.5	70	26	50	40	200			95	150
48	46	95	34	70	53	200	250		110	200
73	69	140	44	95	80	250	350		110	250

^aFor nominal system voltage greater than maximum system voltage, use the next higher voltage class for applied voltage test levels.

^bInduced voltage tests shall be conducted at $2.0 \times$ nominal system voltage for 7200 cycles.

^cBold typeface BILs are the most commonly used standard levels.

^dY-Y connected transformers using a common solidly grounded neutral may use neutral BIL selected in accordance with the low-voltage winding rating.

^eSingle-phase distribution and power transformers and regulating transformers for voltage ratings between terminals of 8.7 kV and below are designed for both Y and Δ connection, and are insulated for the test voltages corresponding to the Y connection so that a single line of transformers serves for the Y and Δ applications. The test voltages for such transformers, when connected and operated, are therefore higher than needed for their voltage rating.

^fFor series windings in transformers, such as regulating transformers, the test values to ground shall be determined by the BIL of the series windings rather than by the rated voltage between terminals.

^gValues listed as nominal system voltage in some cases (particularly voltages 34.5 kV and below) are applicable to other lesser voltages of approximately the same value. For example, 15 kV encompasses nominal system voltages of 14 440 V, 13 800 V, 13 200 V, 13 090 V, 12 600 V, 12 470 V, 12 000 V, 11 950 V.

^hNeutral BIL shall never exceed winding BIL.

Table 4—Dielectric insulation levels for all windings of Class II power transformers, voltages in kV

Maximum system voltage (kV rms)	Nominal system voltage ^a (kV rms)	Applied voltage test ^{b,c} (kV rms)			Induced voltage test ^{b,c} (phase to ground) (kV rms)		Winding line-end BIL ^d (kV crest)				Neutral BIL ^{e,f} (kV crest)	
		Delta and fully insulated wye	Grounded wye	Impedance grounded wye or grounded wye with higher BIL	Enhanced 7200 cycle	One hour	Mini- mum	Alternates		Grounded wye	Impedance grounded wye or grounded wye with higher BIL	
Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7	Col 8	Col 9	Col 10	Col 11	Col 12	Col 13
< 1 ^g	< 15	34	34	34	16	14	110				110	110
26	25	50	34	40	26	23	150				110	125
36	34.5	70	34	50	36	32	200				110	150
48	46	95	34	70	48	42	200	250			110	200
73	69	140	34	95	72	63	250	350			110	250
12	115	173	34	95	120	105	350	450	550		110	250
145	138	207	34	95	145	125	450	550	650		110	250
169	16	242	34	140	170	145	550	650	750	825	110	350
242	230	345	34	140	240	210	650	750	825	900	110	350
362	345	518	34	140	360	315	900	1050	1175		110	350
550	500	N/A	34	140	550 ^h	475 ^h	1425	1550	1675		110	350
765	735	N/A	34	140	880 ⁱ	750 ⁱ	1950 ^j	2050			110	350
800	765	N/A	34	140	885 ⁱ	795 ⁱ	1950 ^j	2050			110	350

^aFor nominal system voltage greater than maximum system voltage, use the next higher voltage class for applied test levels

^bInduced voltage tests shall be conducted at 1.58 × nominal system voltage for one hour and 1.80 × nominal system voltage for enhanced 7200 cycle test.

^cColumn 6 and Column 7 provide phase-to-ground test levels that would normally be applicable to wye windings. When the test voltage level is to be measured phase-to-phase (as is normally the case with delta windings), the levels in Column 6 and Column 7 must be multiplied by 1.732 to obtain the required phase-to-phase induced-voltage test level.

^dBold typeface BILs are the most commonly used standard levels

^eY-Y connected transformers using a common solidly grounded neutral may use neutral BIL selected in accordance with the low-voltage winding rating

^fFor 500 kV to 765 kV nominal system voltages, induced voltage test levels do not follow rules in footnote b, and 1950 kV BIL is not a standard IEEE level

^gIf user specifies a different BIL for the neutral than indicated above, the applied test voltage shall also be specified.

الملحق (4-5)

قيمة معامل التصحيح k وفقاً للكُتَيْب التفصيلي الخاص بجهاز الفحص (DELTA2000) المُصنَّع بواسطة شركة (MEGGER)

الجدول رقم (4-5-1)

معامل التصحيح	درجة الحرارة (°C)	معامل التصحيح	درجة الحرارة (°C)
0.73	27	1.56	0
0.70	28	1.54	1
0.67	29	1.52	2
0.63	30	1.50	3
0.60	31	1.48	4
0.58	32	1.46	5
0.56	33	1.45	6
0.53	34	1.44	7
0.51	35	1.43	8
0.49	36	1.41	9
0.47	37	1.38	10
0.45	38	1.35	11
0.44	39	1.31	12
0.42	40	1.27	13
0.38	42	1.24	14
0.36	44	1.20	15
0.33	46	1.16	16
0.30	48	1.12	17
0.28	50	1.08	18
0.26	52	1.04	19
0.23	54	1	20
0.21	56	0.96	21
0.19	58	0.91	22
0.17	60	0.87	23
0.16	62	0.83	24
0.14	66	0.79	25
0.12	70	0.76	26

قيمة معامل التصحيح k وفقاً للكُتَيْب التفصيلي الصادر عن شركة (Doble) والخاص بخطوات هذا الفحص [Doble Test Procedure, 72A-2244 Rev.A]

المحولات

TABLE OF MULTIPLIERS FOR USE IN CONVERTING POWER FACTORS
AT TEST TEMPERATURES TO POWER FACTORS AT 20°C



LIQUID-FILLED TRANSFORMERS, SHUNT REACTORS, AND VOLTAGE REGULATORS														
POWER TRANSFORMERS (Above 500 KVA)				DISTRIBUTION TRANSFORMERS (500 KVA and Below)				PTs/VTs, CTs, and MOs						
Askael- Filled Trans.	Free Breathing and Pre-1955 Conservator Types		Sealed, Gas-blanketed, and Modern Conservator Types		Silicone Askael	Oil-Filled		TEST TEMPERATURES °C	TEST TEMPERATURES °F	HV/EHV Shunt Reactors (Oil-Filled)	Voltage Regulators (Oil-Filled)	Askael	Oil-Filled	
	Types	Types	Prior to 1950	Modern		Silicone	Modern, Refined 220 kV and Above						Others	
-	1.56	.95	-	1.56	1.57	-	-	0	32.0	.95	1.56	-	1.57	1.67
-	1.52	.96	-	1.52	1.50	-	-	2	35.6	.96	1.52	-	1.50	1.61
-	1.48	.98	-	1.48	1.44	-	-	4	39.2	.96	1.48	-	1.44	1.55
-	1.45	.98	-	1.45	1.37	-	-	6	42.8	.98	1.45	-	1.37	1.49
-	1.43	.99	-	1.43	1.31	-	-	8	46.4	.99	1.43	-	1.31	1.43
-	1.38	.99	-	1.38	1.25	-	-	10	50.0	.99	1.38	-	1.25	1.36
-	1.31	1.00	-	1.31	1.19	-	-	12	53.6	1.00	1.31	-	1.19	1.30
-	1.24	1.01	-	1.24	1.14	-	-	14	57.2	1.01	1.24	-	1.14	1.23
-	1.16	1.01	-	1.16	1.09	-	-	16	60.8	1.01	1.16	-	1.09	1.16
-	1.08	1.00	-	1.08	1.05	-	-	18	64.4	1.00	1.08	-	1.05	1.08
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	20	68.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
.90	.91	.99	.96	.81	.96	.96	.96	22	71.6	.99	.81	.90	.96	.93
.81	.83	.98	.82	.83	.82	.82	.82	24	75.2	.98	.83	.81	.92	.86
.72	.76	.97	.80	.72	.88	.86	.86	26	78.8	.97	.76	.72	.88	.80
.64	.70	.96	.84	.70	.84	.84	.84	28	82.4	.96	.70	.64	.84	.74
.56	.63	.95	.80	.56	.63	.80	.80	30	86.0	.95	.63	.56	.80	.68
.51	.58	.94	.76	.51	.58	.76	.76	32	89.6	.94	.58	.51	.76	.85
.46	.53	.93	.73	.46	.53	.73	.73	34	93.2	.93	.53	.46	.73	.80
.42	.49	.91	.70	.42	.49	.70	.70	36	96.8	.91	.49	.42	.70	.76
.39	.45	.90	.67	.39	.45	.67	.67	38	100.4	.90	.45	.39	.67	.72
.35	.42	.89	.65	.35	.42	.65	.65	40	104.0	.89	.42	.35	.65	.68
.33	.38	.87	.62	.33	.38	.62	.62	42	107.6	.87	.38	.33	.62	.65
.30	.36	.86	.59	.30	.36	.59	.59	44	111.2	.86	.36	.30	.59	.62
.28	.33	.84	.56	.28	.33	.56	.56	46	114.8	.84	.33	.28	.56	.58
.26	.30	.83	.54	.26	.30	.54	.54	48	118.4	.83	.30	.26	.54	.54
.24	.28	.81	.51	.24	.28	.51	.51	50	122.0	.81	.28	.24	.51	.51
.22	.26	.79	.49	.22	.26	.49	.49	52	125.6	.79	.26	.22	.49	.49
.21	.23	.77	.47	.21	.23	.47	.47	54	129.2	.77	.23	.21	.47	.47
.19	.21	.75	.45	.19	.21	.45	.45	56	132.8	.75	.21	.19	.45	.45
.18	.19	.72	.43	.18	.19	.43	.43	58	136.4	.72	.19	.18	.43	.43
.16	.17	.70	.41	.16	.17	.41	.41	60	140.0	.70	.17	.16	.41	.41

©1993 Doble Engineering Company
All rights reserved

TMCP 2000 REV A

قيمة معامل التصحيح k وفقاً للكُتَيْب التفصيلي الصادر عن شركة (Doble) والخاص بخطوات هذا الفحص [Doble Test Procedure, 72A-2244 Rev.A]

عوازل الإختراق (1/2)

TABLE OF MULTIPLIERS FOR USE IN CONVERTING POWER FACTORS
AT TEST TEMPERATURES TO POWER FACTORS AT 20°C



BUSHINGS													
ABB		ASEA	BROWN BOVERI		TEST TEMPERATURES		GENERAL ELECTRIC						HAEFELY
Type T	Type O + C	AI GO Types 25-765 kV	Types CTKF 20-60 kV	Types CTF, CTKF 85-330 kV	°C	°F	Type B	Type F	Types L, LC, LL, LM	Types OF, OFI, OFM	Types S, SI, SIM (Cpd., Filled)	Types Tendu	Types COS, SOT
1.02	.87	.79	1.24	1.00	0	32.0	1.09	.93	1.00	1.18	1.26	1.02	-
1.02	.89	.81	1.22	1.00	2	35.6	1.09	.95	1.00	1.16	1.24	1.02	-
1.02	.91	.83	1.20	1.00	4	39.2	1.09	.97	1.00	1.15	1.21	1.02	-
1.01	.92	.85	1.17	1.00	6	42.8	1.08	.98	1.00	1.13	1.19	1.01	-
1.01	.93	.87	1.15	1.00	8	46.4	1.08	.99	1.00	1.11	1.16	1.01	-
1.01	.94	.89	1.12	1.00	10	50.0	1.07	.99	1.00	1.10	1.14	1.01	0.86
1.01	.95	.92	1.10	1.00	12	53.6	1.06	.99	1.00	1.08	1.11	1.01	0.90
1.01	.96	.94	1.06	1.00	14	57.2	1.05	1.00	1.00	1.06	1.08	1.01	0.93
1.00	.98	.95	1.05	1.00	16	60.8	1.04	1.00	1.00	1.04	1.06	1.00	0.95
1.00	.99	.98	1.03	1.00	18	64.4	1.02	1.00	1.00	1.02	1.03	1.00	0.96
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	20	68.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.00	1.01	1.03	.98	1.00	22	71.6	.97	.99	.99	.97	.97	1.00	1.02
1.00	1.02	1.05	.96	1.00	24	75.2	.93	.97	.98	.94	.93	1.00	1.04
.99	1.03	1.07	.94	1.00	26	78.8	.90	.96	.98	.91	.90	.99	1.07
.99	1.04	1.09	.91	1.00	28	82.4	.85	.94	.97	.88	.87	.99	1.09
.98	1.05	1.12	.88	1.00	30	86.0	.81	.92	.96	.86	.84	.98	1.11
.97	1.06	1.14	.86	1.00	32	89.6	.77	.89	.95	.83	.81	.97	1.13
.97	1.07	1.17	.84	1.00	34	93.2	.73	.87	.94	.80	.77	.97	1.15
.96	1.07	1.19	.82	1.00	36	96.8	.69	.84	.93	.77	.74	.96	1.17
.95	1.09	1.21	.80	1.00	38	100.4	.65	.81	.91	.74	.70	.95	1.19
.94	1.09	1.23	.78	1.00	40	104.0	.61	.78	.89	.70	.67	.94	1.21
.93	1.08	1.26	.76	1.00	42	107.6	-	.74	.87	.67	.63	.93	1.22
.91	1.10	1.28	.74	1.00	44	111.2	-	.70	.85	.63	.60	.91	1.24
.89	1.10	1.30	.72	1.00	46	114.8	-	.64	.83	.61	.56	.89	1.25
.87	1.11	1.31	.70	1.00	48	118.4	-	.58	.82	.58	.53	.87	1.26
.86	1.11	1.33	.68	1.00	50	122.0	-	.52	.80	.56	.50	.86	1.27
.84	1.11	1.34	.66	1.00	52	125.6	-	-	.79	.53	.47	.84	1.28
.82	1.11	1.36	.64	1.00	54	129.2	-	-	.76	.51	.44	.82	1.29
.79	1.11	1.37	.62	1.00	56	132.8	-	-	.77	.49	.41	.79	1.30
.77	1.12	1.37	.60	1.00	58	136.4	-	-	.76	.46	.38	.77	1.29
.75	1.12	1.38	.58	1.00	60	140.0	-	-	.74	.44	.36	.75	1.27

©1993 Doble Engineering Company
All rights reserved

TMOF-4950



TABLE OF MULTIPLIERS FOR USE IN CONVERTING POWER FACTORS
AT TEST TEMPERATURES TO POWER FACTORS AT 20°C (BUSHINGS - continued)

LAPP				McGRAW-EDISON	MICAFIL	MICANITE AND INSULATORS CO.		OHIO BRASS				PASSONI VILLA		WESTINGHOUSE		
Class ¹ ERC 15-23 kV	Class PRC 15-69 kV	Class POC 15-765 kV	Types P, PA, PB	Types WT,F	Types Above 25-69 kV	Types Above 69 kV	TEST TEMPERATURES °C	TEST TEMPERATURES °F	Class G or L 46- 138 kV	Class L 7.5- 34.5 kV	Class GK 15- 500 kV	Class LK 15- 69 kV	Type PTAO, 3 PVF 25-250 kV	Con- denser, except Type O	Types O O-Al OC	Types O+ and O+C
90	81	1.00	68	—	1.55	1.13	0	32.0	1.54	1.29	.90	.85	.65	1.61	.88	.87
91	83	▲	.70	—	1.49	1.11	2	35.6	1.47	1.26	.91	.86	.69	1.52	.89	.88
92	86	—	.72	—	1.43	1.10	4	39.2	1.40	1.24	.91	.87	.74	1.44	.90	.91
93	88	—	.76	—	1.37	1.08	6	42.8	1.34	1.21	.92	.88	.78	1.38	.91	.92
94	89	—	.79	—	1.31	1.07	8	46.4	1.28	1.19	.92	.90	.82	1.30	.93	.93
95	92	—	.82	—	1.25	1.06	10	50.0	1.24	1.16	.93	.92	.85	1.23	.94	.94
96	94	—	.85	—	1.20	1.05	12	53.6	1.18	1.12	.94	.93	.86	1.16	.95	.95
97	95	—	.87	1.00	1.15	1.04	14	57.2	1.14	1.09	.95	.95	.82	1.13	.96	.96
98	97	—	.89	1.00	1.10	1.02	16	60.8	1.09	1.06	.97	.96	.95	1.08	.98	.98
99	98	—	.96	1.00	1.05	1.01	18	64.4	1.04	1.03	.98	.98	.97	1.04	.99	.99
100	100	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	20	68.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
100	100	—	1.02	—	.96	.99	22	71.6	.95	.97	1.02	1.02	1.02	.96	1.01	1.01
101	103	—	1.10	—	.91	.98	24	75.2	.91	.94	1.04	1.04	1.05	.92	1.02	1.02
102	105	—	1.14	—	.87	.96	26	78.8	.86	.91	1.06	1.06	1.07	.88	1.04	1.03
102	107	—	1.18	—	.84	.95	28	82.4	.84	.88	1.09	1.09	1.09	.84	1.05	1.04
103	110	—	1.24	—	.80	.94	30	86.0	.80	.86	1.11	1.10	1.11	.81	1.06	1.05
103	111	—	1.29	—	.77	.93	32	89.6	.77	.83	1.13	1.12	1.13	.77	1.07	1.06
104	112	—	1.32	▼	.74	.92	34	93.2	.74	.80	1.15	1.14	1.16	.74	1.08	1.07
104	113	—	1.36	1.00	.70	.90	36	96.8	.71	.76	1.17	1.15	1.17	.70	1.08	1.07
105	114	—	1.41	.99	.67	.89	38	100.4	.69	.75	1.19	1.17	1.18	.67	1.09	1.08
105	115	—	1.45	.96	.64	.88	40	104.0	.65	.72	1.21	1.18	1.18	.64	1.09	1.08
105	115	—	1.50	.96	.61	.87	42	107.6	—	—	1.22	1.19	1.20	.62	1.10	1.09
106	115	—	1.55	.97	.58	.86	44	111.2	—	—	1.24	1.20	1.22	.58	1.11	1.10
106	115	—	1.58	.97	.55	.85	46	114.8	—	—	1.26	1.21	1.24	.56	1.11	1.10
107	114	—	1.61	.96	.52	.84	48	118.4	—	—	1.27	1.21	1.24	.53	1.10	1.11
107	113	—	1.65	.95	.50	.83	50	122.0	—	—	1.29	1.22	1.25	.51	1.10	1.11
107	111	—	1.67	.94	—	—	52	125.6	—	—	1.30	1.22	1.26	.50	1.10	1.11
108	109	—	1.67	.94	—	—	54	129.2	—	—	1.31	1.22	1.26	.48	1.08	1.11
108	107	—	1.67	.90	—	—	56	132.8	—	—	1.33	1.22	1.26	.47	1.08	1.11
108	106	—	1.68	.90	—	—	58	136.4	—	—	1.34	1.21	1.26	.46	1.07	1.12
107	105	1.00	1.68	.92	—	—	60	140.0	—	—	1.35	1.21	1.25	.45	1.06	1.12

¹This curve is applicable to those ERC bushings which were manufactured after March 1967 (S/N 3530 or higher)

TMCF-4950

©1993 Doble Engineering Company
All rights reserved

عوازل الإختراق (2/2)

الملحق (5-5)

مجموعة من القيم المرجعية الخاصة بهذا الفحص وفقاً للنوع وللشركة المُصنَّعة لعازل الإختراق (Bushing) كما ورد في النشرة التقنية [USBR, Testing and Maintenance of High-Voltage Bushings Vol 3-2]

Table 2 - Manufacturer's P. F. (power factor) limits for bushings			
Manufacturer	Bushing type or class	Initial P.F. for new bushings, at	Dangerous P. F. value at 20 °C (%)
General electric	A	6.0	8.0
	B	10.0	12.0
	F	1.5	2.0
	L	3.0	4.0
	LC	2.5	3.5
	OF	2.5	6.0
	S	3.5	6.0
	U	1.0	1.5
Lapp bushings	POC	0.5	
	PRC	0.7-1.2	
Ohio Brass manufactured prior to 1926 and after 1938	ODOF G L	1-10	Initial P.F. = 22
Ohio Brass manufactured 1926 to 1938, inclusive	ODOF G L	2-4	Initial P.F. = 16
Ohio Brass	Class GK type C	0.4-0.6	
	Class LK type A	0.6-0.7	
Pennsylvania Transformer	P PA PB	0.5	1.0
Westinghouse	D		6.0
	O		1.4
	OCB & Inst. Trans. 69-kV and Below		3.5
	OCB & Inst. Trans. 92-kV to 138-kV		2.8
	Power & Dist. Trans. OCB & 161-kV to 288-kV		2.0

الملحق (5-6)

بعض العوامل المؤثرة في نتيجة فحص معامل التبديد/القدرة والتي قد تؤدي لظهور نتائج فحص مرتفعة أو منخفضة جداً أو معامل قدرة ذو قيمة سالبة كما ورد في كتاب [Jill C. Duplessis, Electric Field Tests for the Life Management of Transformers]

الأسباب المحتملة لإرتفاع نتيجة فحص معامل القدرة أو إنخفاضها بشكل غير طبيعي أو ظهور معامل قدرة ذو قيمة سالبة	مركبة العزل في المحول
<ul style="list-style-type: none"> ✓ عدم فك الموصلات (القضبان) عن أطراف ملفات الفولتية المرتفعة/المنخفضة ✓ واحدة أو أكثر من عوازل الإختراق حالتها سيئة. ✓ تيار تسرب سطحي ذو قيمة مرتفعة نتيجة للظروف الجوية المحيطة. ✓ إستخدام المطاط لعزل أسلاك الفحص وللحصول على المسافة الكهربائية الفاصلة المناسبة. ✓ خزان محول غير متصل بالأرض. (معامل قدرة ذو قيمة سالبة) ✓ الرطوبة (Moisture). ✓ مسار تأريض مادي غير مقصود. ✓ الملوثات (Contamination). ✓ التقادم (Aging). ✓ التفريغ الجزئي (Partial Discharge). ✓ حرارة الزيت العلوي. 	<p>العزل بين ملفات الفولتية المرتفعة والأرض</p> <p>CH</p> <p>أو</p> <p>العزل بين ملفات الفولتية المنخفضة والأرض</p> <p>CL</p>
<ul style="list-style-type: none"> ✓ الرطوبة (Moisture). ✓ الملوثات (Contamination). ✓ التقادم (Aging). ✓ التفريغ الجزئي (Partial Discharge). ✓ وافي الملفات البيئية متصل بالأرض. (معامل قدرة ذو قيمة سالبة) ✓ مسار تأريض مادي غير مقصود. ✓ خزان محول غير متصل بالأرض. (معامل قدرة ذو قيمة سالبة) ✓ حرارة الزيت العلوي. 	<p>العزل بين ملفات الفولتية المرتفعة وملفات الفولتية المنخفضة</p> <p>CHL</p>

الملحق (5-7)

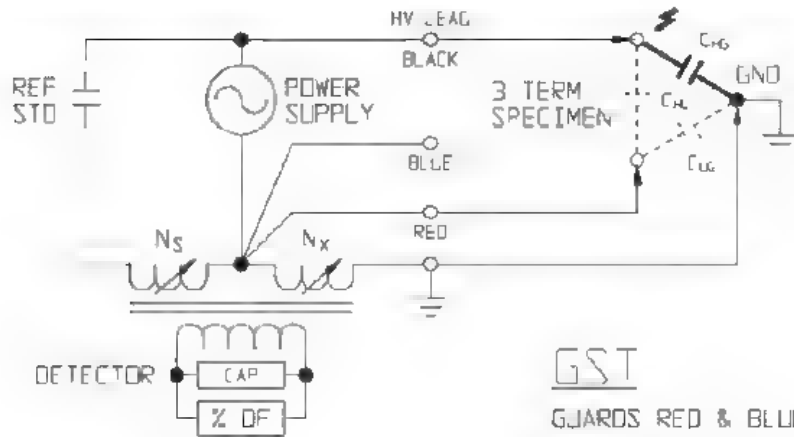
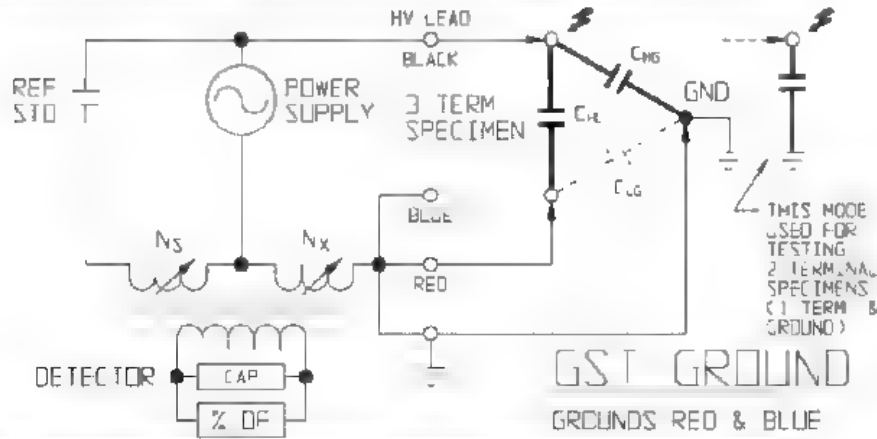
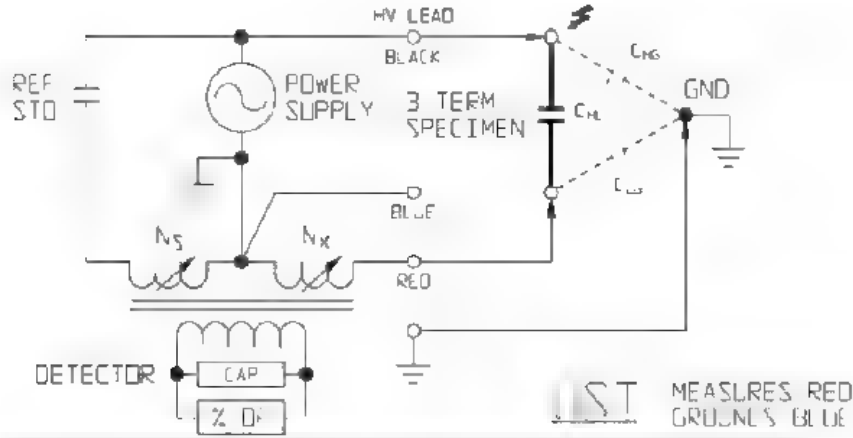
بعض العوامل المؤثرة في نتيجة فحص المواسعة كما ورد في كتاب [Jill C. Duplessis, Electric Field Tests for the Life Management of Transformers]

الأسباب المحتملة لتغير قيمة فحص المواسعة	مركبة العزل في المحول
<ul style="list-style-type: none"> ✓ عدم فك الموصلات (القضبان) عن أطراف ملفات الفولتية المرتفعة/المنخفضة (زيادة في المواسعة) ✓ تشوه في ملفات الفولتية المرتفعة. ✓ تغيير عوازل إختراق الفولتية المرتفعة بأخرى ذات أبعاد هندسية مختلفة. ✓ أسلوب فحص (Test mode) خاطئ. ✓ خزان محول مفرغ من الزيت. ✓ خزان محول غير متصل بالأرض. 	<p>العزل بين ملفات الفولتية المرتفعة والأرض</p> <p>CH</p>
<ul style="list-style-type: none"> ✓ تشوه في ملفات المحول. ✓ أسلوب فحص (Test mode) خاطئ. ✓ خزان محول مفرغ من الزيت. ✓ خزان محول غير متصل بالأرض. 	<p>العزل بين ملفات الفولتية المرتفعة وملفات الفولتية المنخفضة</p> <p>CHL</p>
<ul style="list-style-type: none"> ✓ عدم فك الموصلات (القضبان) عن أطراف ملفات الفولتية المرتفعة/المنخفضة (زيادة في المواسعة) ✓ تشوه في ملفات الفولتية المنخفضة. ✓ قلب حديدي غير متصل بالأرض. (إنخفاض في المواسعة) ✓ تغيير عوازل إختراق الفولتية المنخفضة بأخرى ذات أبعاد هندسية مختلفة. ✓ أسلوب فحص (Test mode) خاطئ. ✓ خزان محول مفرغ من الزيت. ✓ خزان محول غير متصل بالأرض. 	<p>العزل بين ملفات الفولتية المنخفضة والأرض</p> <p>CL</p>

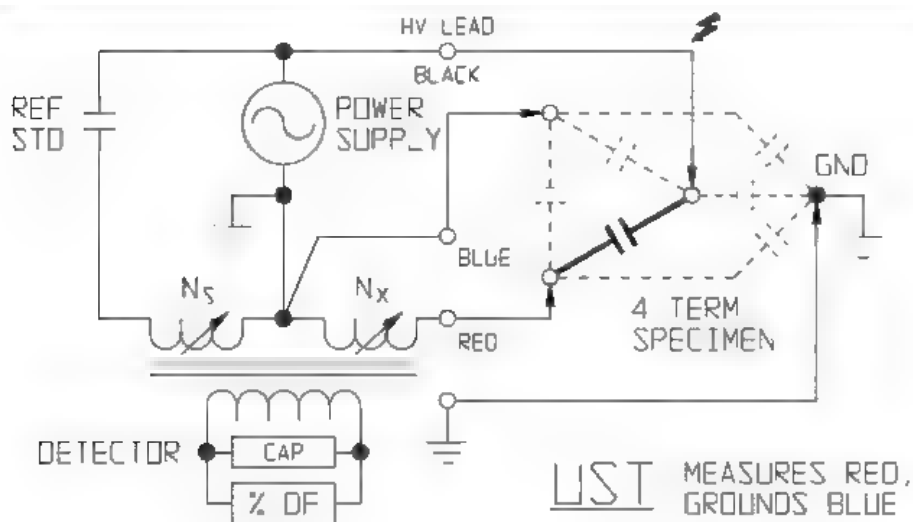
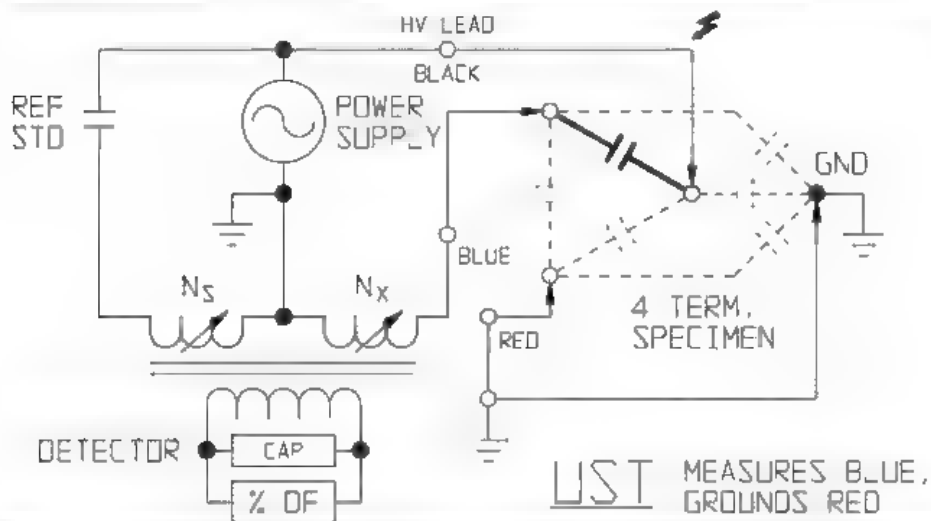
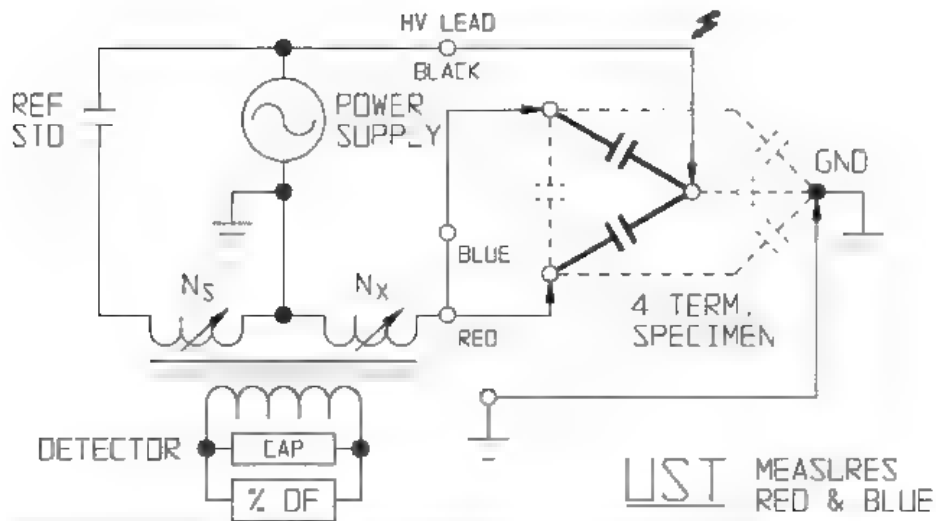
الملحق (5-8)

بالرجوع إلى الكتيب التفصيلي لجهاز الفحص (DETL2000) المُصنَّع بواسطة شركة (MEGGER) يُمكن إيجاد توصيلات أساليب الفحص المختلفة والتي يتم التوضيح من خلالها كيفية ربط أطراف الجهاز خارجياً وداخلياً كالآتي:

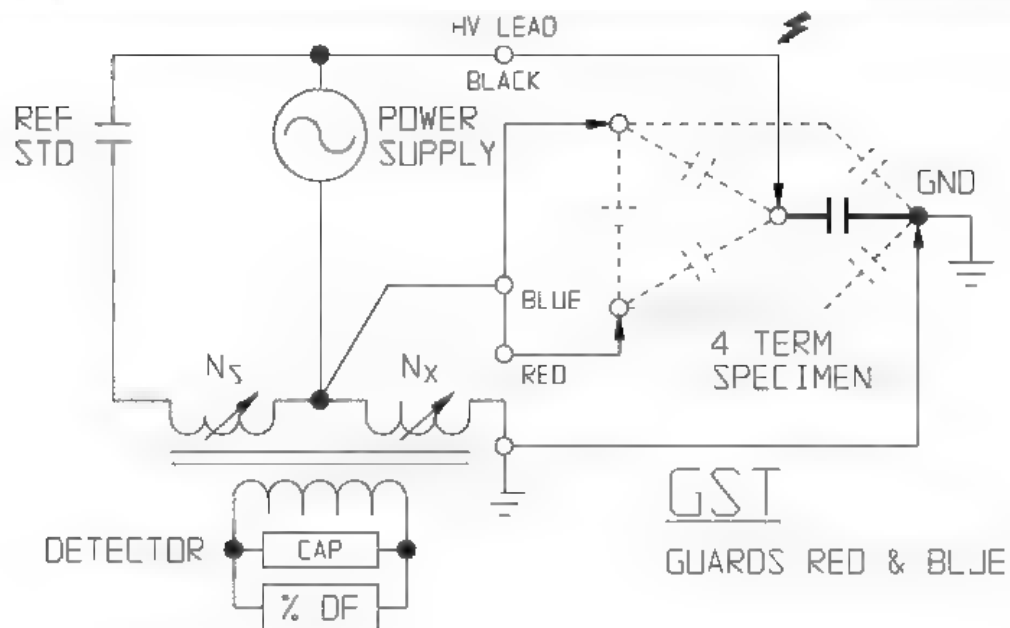
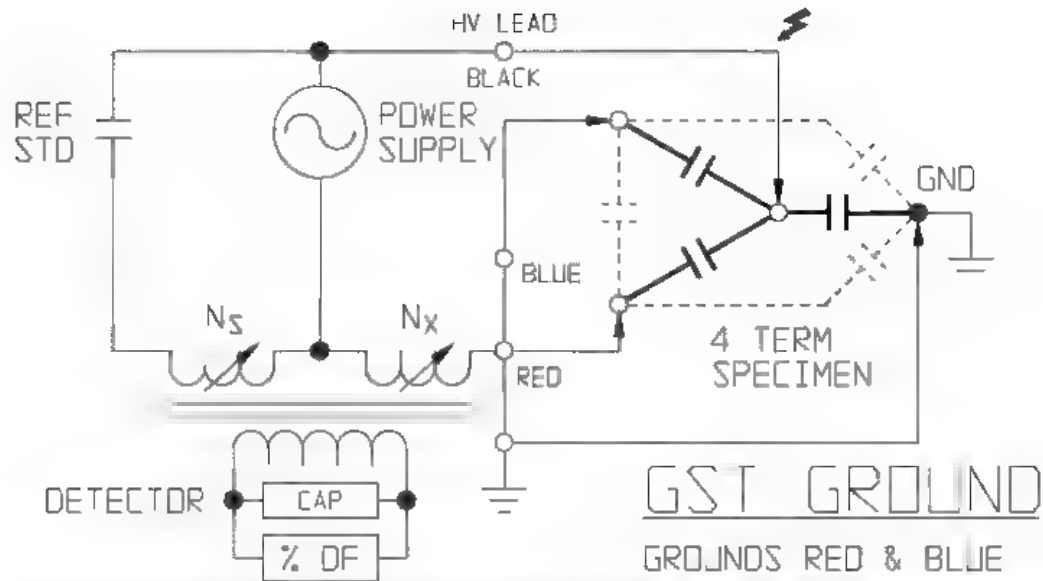
✓ المحولات ثلاثية الأطوار ثنائية الملفات



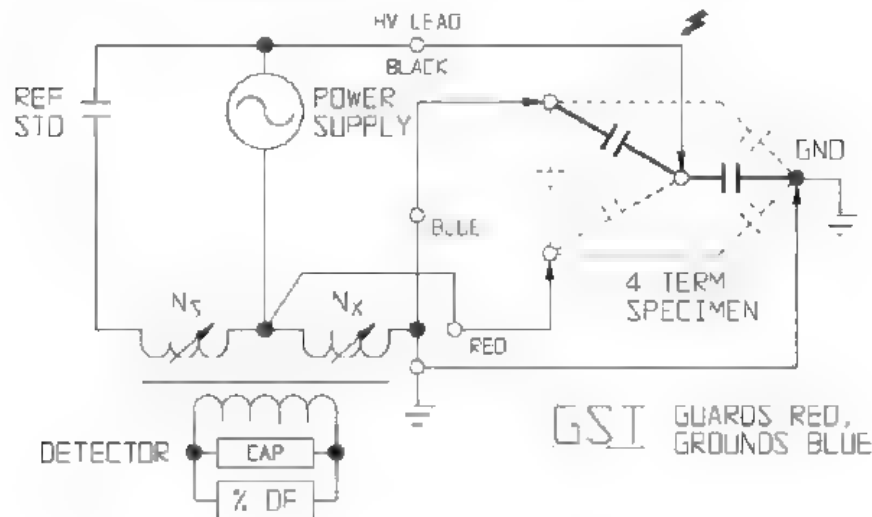
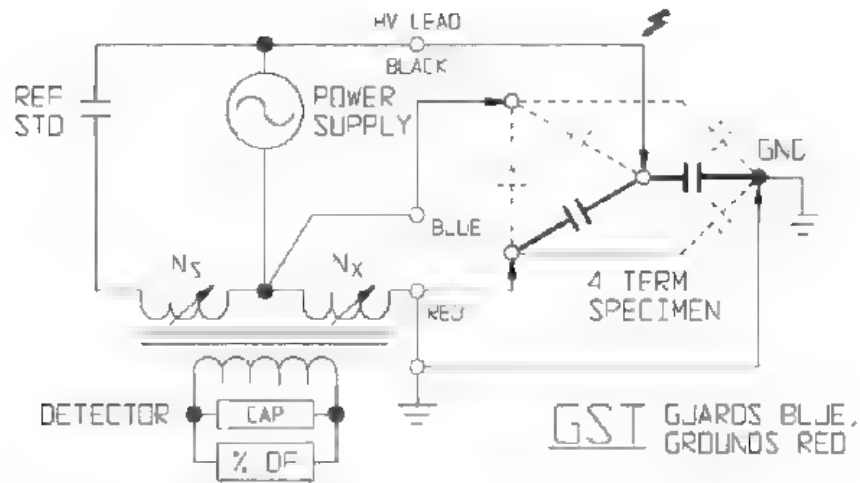
✓ المحولات ثلاثية الأطوار ثلاثية الملفات (UST)



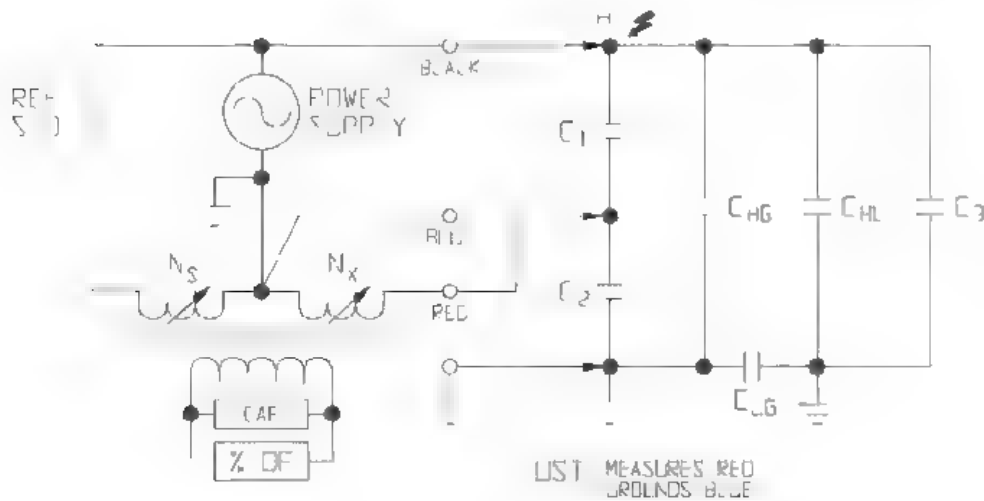
✓ المحولات ثلاثية الأطوار ثلاثية الملفات (GST)



✓ المحولات ثلاثية الأطوار ثلاثية الملفات (GST-Guard)



✓ عوازل الإختراق (UST)



الفصل السادس

فحص تيار التهيج

Excitation Current Test



فحص تيار التهيج

Excitation Current Test

يُعتبر فحص تيار التهيج أو كما يُسمى تيار المغنطة من الفحوصات المهمة لمعرفة الحالة الداخلية للمحول خاصة حالة القلب الحديدي لهذا المحول، حيث يُعبّر هذا الفحص عن كمية الطاقة الضائعة في القلب الحديدي للمحول عند حقن أحد ملفاته بفولتية مترددة في حين باقي ملفاته مفتوحة (أي غير موصولة بحمل)، أو بمعنى آخر فإنه يُعبّر عن الطاقة اللازمة ليقوم المحول بعمله وهو بناء فولتية على أطرافه الثانوية نتيجة لتطبيق فولتية مترددة على أطرافه الابتدائية دون إتصال كهربائي وهو ما يُسمى بالـ (Transformer action)، ويتم معرفة قيمة هذه الطاقة الضائعة عن طريق قياس قيمة التيار اللارم لمغنطة القلب الحديدي للمحول وهو ما يُشار إليه بتيار التهيج أو المغنطة أو تيار اللاحمل. كما ويُمثل هذا الفحص النسخة الموقعية (Site test) من فحص الدائرة المفتوحة المصنعي (Open circuit test) من حيث المبدأ مع وجود تغيرات في طريقة الفحص. ونظراً لأن مقدار فولتية الفحص أقل من مقدار الفولتية الإسمية للمحول فإن هذا الفحص يُعد من الفحوصات غير التدميرية (Non-destructive test) أي أنه لا يؤثر على سلامة المادة العازلة في المحول.

في المحولات المثالية تكون الطاقة الداخلة (Energy in) مساوية للطاقة الخارجة (Energy out)، ولكن بالواقع لا يوجد ما يُسمى بالمحول المثالي وذلك لوجود مكونات بالمحول تستهلك طاقة على شكل ضياعات في حالي الحمل (Load) واللاحمل (No-load) والتي من شأنها عمل فرق بين الطاقة الداخلة للمحول والخارجة منه، ونظراً لأن هذا الفحص يتم إجراؤه أثناء فتح أطراف الملفات الثانوية للمحول فإنه يُعطي قيمة ضياعات اللاحمل أو كما تُسمى بالضياعات الثابتة أو ضياعات القلب (Core losses) دون التطرق لضياعات الحمل (Load losses) لأنها تعتمد على قيمة التيار (I^2R) بشكل رئيسي، في حين أن التيار في هذا الفحص ذو قيمة صغيرة بالملي أمبير (mA) مما يعني ضياعات حمل ذات قيمة يُمكن إهمالها. وتعتمد ضياعات اللاحمل (No-load losses) على نوع المادة وتشكيلها الهندسي ومنه فإن أي تغيير في قيمة هذا الفحص يعكس اختلاف في الحالة الداخلية للمحول ووجود أعطال.

وكما ذكر سابقاً فإن سلامة أي محول تتلخص في سلامة ثلاثة أنظمة داخلية للمحول وهي نظام العزل والنظام الميكانيكي والنظام الحراري، حيث أن أي فشل في أي من هذه الأنظمة سيؤدي إلى فشل المحول بالكامل، وهذا الفحص يُمكن من الكشف عن سلامة جميع الأنظمة سابقة الذكر.

1. متى يتم إجراء هذا الفحص ولماذا؟

هناك عدة أسباب تدفعنا لإجراء هذا الفحص ومن هذه الأسباب ما هو روتيني للتأكد من سلامة المحول أو تشخيصي لتحديد الأعطال في المحول (وهو مجال بحثنا في هذا الكتاب) أو لأسباب خاصة أخرى، وتتلخص هذه الأسباب بالآتي:

1.1 في المصنع لضبط الجودة المصنعية (Quality Control - QC) وكذلك يُعتبر من فحوصات القبول المصنعية (Factory Acceptance Test - FAT) للتأكد من سلامة المحول ومطابقته للتصميم قبل نقله للموقع.

1.2 في الموقع قبل كهرة المحول للمرة الأولى (Transformer first energization) كأحد فحوصات القبول الموقعية (Site Acceptance Test - SAT) للتأكد من سلامة المحول بعد نقله وتركيبه في الموقع.

1.3 بشكل روتيني (Routine test) وذلك للكشف عن وضع المحول الحالي وإستخدام نتيجة هذا الفحص كمرجع (Reference value).

1.4 تحديد الأعطال داخل المحول (Fault detection - Diagnostic test)، وهو ما سيتم تناوله في هذا الفصل.

2. الدوافع التشخيصية لعمل هذا الفحص وما هي الأعطال التي يتم الكشف عنها

يتم اللجوء لعمل هذا الفحص بهدف تشخيصي في حال حدوث فصل قسري للمحول (Trip) نتيجة لتفعل مُرحل البوخلز (Buchholz Relay) أو في حال إرتفاع درجة حرارة المحول أو في حال ظهور نتائج غير مُرضية لفحص الغازات الذائبة في الزيت (Dissolved Gas Analysis - DGA) خاصة عند ظهور غازات (الميثان - CH_4 و الإيثان - C_2H_6 و الإيثيلين - C_2H_4) مُحتمعة والتي يُطلق عليها غازات إحماء المعدن (Hot metal gases) وعادة ما تكون ناتجة عن إحماء القلب الحديدي للمحول.

ومن الأعطال التي يتم الكشف عنها من خلال هذا الفحص:

- وجود قُطع في ملفات المحول (Open circuit).
- وجود دائرة قِصر (Short circuit) بين لفات ملفات المحول أو بين الملفات والأرض
- وجود نقاط توصيل رديئة (Poor connection).
- وجود أعطال في القلب الحديدي (Iron core) والذي يُمثل الدائرة المغناطيسية للمحول كوجود مشكلة في تأريض هذا القلب الحديدي أو فشل العزل بين الصفائح الرقيقة المكوّنة للقلب أو أي عطل يؤدي إلى إرتفاع قيمة ممانعة القلب الحديدي (Reluctance) لسريان الفيض المغناطيسي
- وجود أعطال في مُغيّر الخطوة (Tap changer):
 - تكرُّين أو تآكل الملامسات.
 - وجود إرتخاء (Loose) في ملامساته المتحركة.
 - فقدان المحاذاة (Misalignment).
 - توصيل خاطئ بين مُغيّر الخطوة وملفات المحول.
 - توصيل معكوس لأطراف (PA transformer) لمُغيّرات الخطوة من النوع (Reactive)
 - وجود قُطع (OC) أو دائرة قِصر (SC) في ملفات (PA Transformer) لمُغيّرات الخطوة من النوع (Reactive).

3. فلسفة الفحص

تكمن فلسفة هذا الفحص في تطبيق فولتية مترددة أحادية الطور (Single phase) على أحد أطوار ملفات المحول، وعادةً ما تكون ملفات الفولتية المرتفعة مع إبقاء ملفات الفولتية المنخفضة مفتوحة (عدا نقطة التعادل إن وجدت)، ومن ثم يتم قياس التيار المار في الملفات المطبق عليها الفولتية المترددة (عادة ملفات الفولتية المرتفعة) بالإضافة إلى إمكانية قياس الخسائر في القدرة (Watt loss) على هذه الملفات

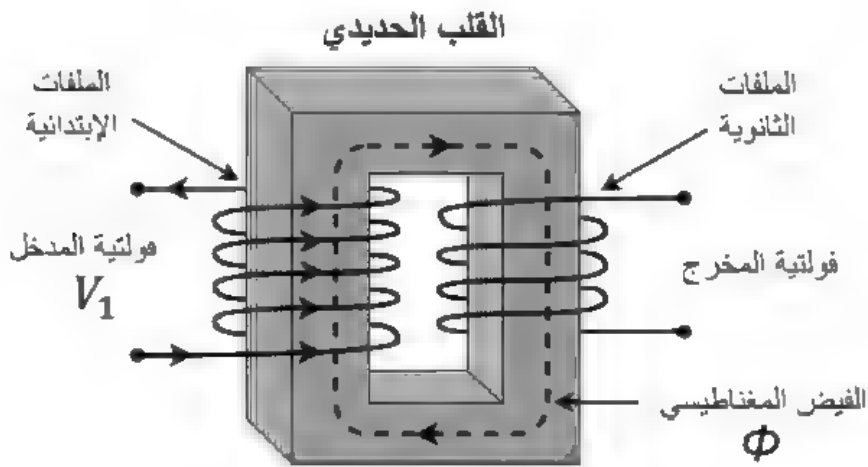
ولكن وقبل الخوض بتفاصيل الفحص وجب التذكير بمبدأ عمل المحول الكهربائي، ولزيادة الفهم سنبدأ بشرح مبدأ عمل المحول الكهربائي المثالي (Ideal Transformer) عديم الضياعات. يعمل المحول المثالي وفقاً لطاهرة الحث الكهرومغناطيسي حيث أن ملفات الإبتدائية تقوم بتحويل الطاقة الكهربائية والمُتمثلة بالفولتية المترددة المُطبقة والتيار الذي يسري في ملفات الإبتدائية إلى فيض مغناطيسي ينتقل عبر القلب الحديدي إلى الملفات الثانوية، ومن ثم يتم تحويل هذا الفيض المغناطيسي إلى طاقة كهربائية مرة أخرى مُتمثلة بفولتية مترددة على أطرافه الثانوية أو ما يُسمى بالقوة الدافعة الكهربائية (Electro-Motive Force EMF - e) حسب قانوني فارادى-نيومان و لينز وفقاً للمعادلة التالية:

$$e = -n \frac{d\phi}{dt} \quad (6.1)$$

حيث:

- e : القيمة اللحظية للقوة الدافعة الكهربائية المُتولدة نتيجة للتغير في الفيض المغناطيسي
- n : عدد اللفات.
- $\frac{d\phi}{dt}$: معدل تغير الفيض المغناطيسي مع الزمن.

ومنه يُمكن ملاحظة أن القوة الدافعة الكهربائية (EMF - e) الناشئة في سلك صمن دائرة مُغلقة تتناسب مع مقدار التغير في الفيض المغناطيسي الذي يتعرض له السلك (قانون فارادى نيومان) وتكون هذه القوة الدافعة الكهربائية مُعاكسة للفيض الذي أنشأها (قانون لينز)، لذلك وصيغت إشارة السالب في المعادلة (6.1) السابقة.



الشكل رقم (6-1)

وبما أن الفولتية المُطبقة على الملف الابتدائي (V_1) على شكل موجة جيبية، فإن الفيض المُتكوّن سيكون جيبياً أيضاً ($\phi = \phi_M \sin(\omega t)$) حيث (ϕ_M) تُعبّر عن قيمة الفيض العظمى (Peak value).

$$e = -n \frac{d\phi_M \sin(\omega t)}{dt} \quad (6.2)$$

$$e = -n \omega \phi_M \cos(\omega t) \quad (6.3)$$

ولأن قيمة القوة الدافعة الكهربائية (e) قيمة مُتفاوتة كما هو موضح بالمعادلة (6.3) السابقة بدلالة وجود ($\cos(\omega t)$) في المعادلة، فلا بُد من إيجاد قيمة الجذر التربيعي لمتوسط القيم المربعة (Root Mean Square - RMS) وذلك بالقسمة على الجذر التربيعي للعدد (2)، حتى يتسنى لنا التعامل حسابياً مع هذه القيمة بسهولة ويُسر.

$$E = -\frac{n \omega \phi_M}{\sqrt{2}} \quad (6.4)$$

بتعويض قيمة السرعة الزاوية (ω - Angular speed) المساوية لـ ($2\pi f$) بالمعادلة، حيث (f) تُعبّر عن التردد لتصبح المعادلة كالتالي:

$$E = -4.44 n \phi_M f \quad (6.5)$$

كما ويُمكن الإستعاضة عن قيمة الفيض العظمى (ϕ_M) بقيمة كثافة الفيض العظمى (B_M) مضروبة بمساحة المقطع العرضي للقلب الحديدي (A) الذي تقطعه خطوط مجال هذا الفيض لتصبح المعادلة كالآتي:

$$E = -4.44 n B_M A f \quad (6.6)$$

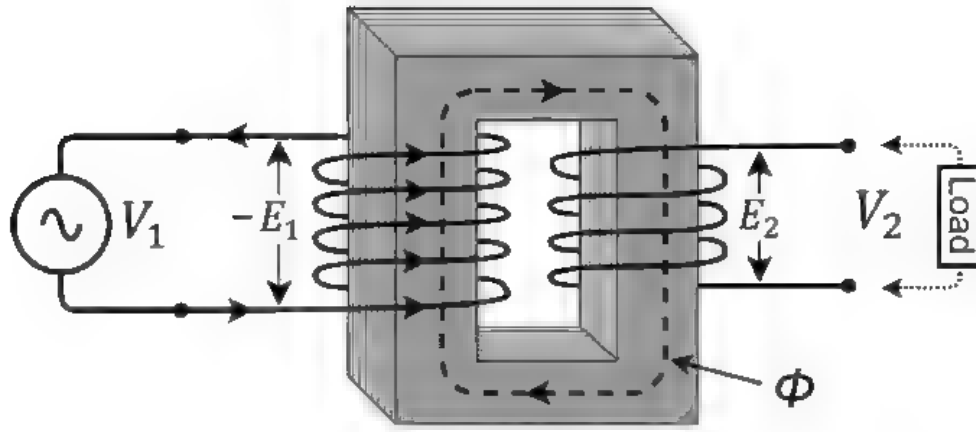
وبذلك نكون قد وصلنا للمعادلتان اللتان توصّحان مقدار القوة الدافعة المتولدة في الملفات الابتدائية والثانوية بالترتيب:

$$E_1 = -4.44 n_1 \phi_M f \quad (6.7)$$

$$E_2 = -4.44 n_2 \phi_M f \quad (6.8)$$

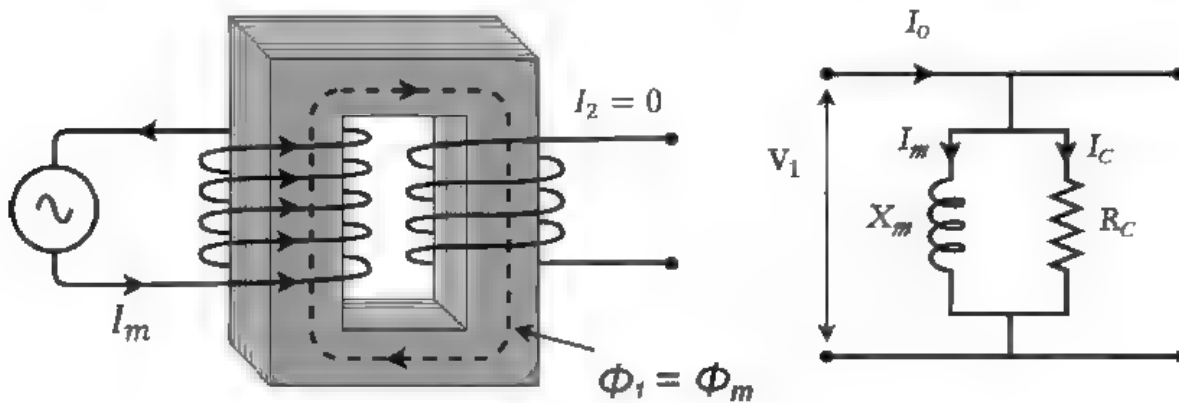
وبقسمة المعادلة (6.7) على المعادلة (6.8) تظهر العلاقة بين الفولتية وعدد اللفات في المحولات المثالية وفقاً للمعادلة التالية:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (6.9)$$



الشكل رقم (6-2)

ولأن هذا الفحص يتم أثناء فتح دائرة الملفات الثانوية للمحول - أي أنه غير متصل بحمل عبر ملفات الثانوية - وهو ما يُسمى بحالة اللاحمل (No-Load)، فإنه في هذه الحالة وعند تطبيق الفولتية المترددة على أطراف المحول المثالي الابتدائية ينشأ تيار بهذه الملفات الابتدائية ذو قيمة عالية (Inrush current) من شأنه تكوين فيض مغناطيسي مُتغيّر داخل القلب الحديدي والذي يؤدي بدوره لتشبع القلب الحديدي ثم ينخفض هذا التيار إلى قيمة قليلة ويثبت عليها وهو ما يُسمى بتيار التهيج أو المغنطة (Magnetization Current - I_m) في هذه الملفات مُنتجاً فيض مغناطيسي ابتدائي (ϕ_1)، وفي حالتنا هذه - حالة اللاحمل - يُكون هو نفسه الفيض المغناطيسي المشترك (ϕ_m) وذلك لعدم وجود فيض مغناطيسي ثانوي (ϕ_2) نتيجة لعدم مرور تيار في الدائرة الثانوية المفتوحة للمحول - لعدم وجود حمل-.



الشكل رقم (6-3)

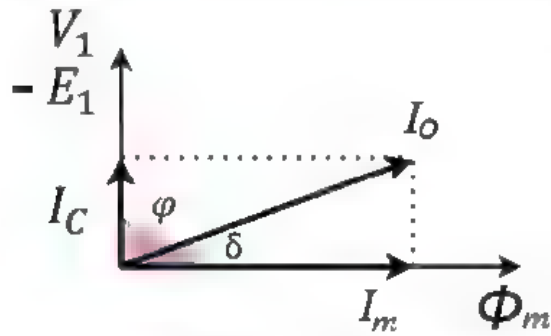
حيث أن هذا الفيض المغناطيسي المشترك (ϕ_m) الذي ينتقل بشكل كامل إلى الملفات الثانوية عبر القلب الحديدي مُؤدياً إلى ظهور قوة دافعة كهربائية معاكسة (E_2 و $-E_1$) في الملفات الابتدائية و الثانوية نتيجة لقطع هذا المجال للذين الملفين.

فلو نظرنا إلى الملفات الابتدائية سنجد قيمتين للفولتية، إحداهما قيمة الفولتية المُطبقة - فولتية المصدر و المشار إليها بالرمز (V_1) و الأخرى هي الفولتية المتولدة نتيجة لتأثير الفيض المشترك (ϕ_m) على الملفات الابتدائية أو ما يُسمى بالقوة الدافعة الكهربائية (E_1) كما هو مبين بالشكل (6-2)، حيث تكون هذه القوة الدافعة الكهربائية مُعاكسة لقيمة الفولتية المُطبقة (V_1) حسب قانون لenz، أي أن الفولتية

المُحصلة ($V_1 - E_1$) المُطبقة على الملفات الابتدائية تكون قليلة مما يُفسر ظهور تيار تهيج أو مغنطة قليل (I_m) وهذا ما يُعرف بظاهرة القوة الدافعة الكهربائية المُعاكسة (Back EMF) ويكون هذا التيار مُطابق مُتجهياً (in-phase) للفيض المغناطيسي المُشترك (ϕ_m) ومُزاح مُتجهياً بمقدار (-90°) عن القوة الدافعة الكهربائية ($-E_1$).

أما فيما يخص الملفات الثانوية، فإن الفيض المُشترك (ϕ_m) سيؤدي لظهور قوة دافعة كهربائية (E_2) على أطراف هذه الملفات كما هو مُبين بالشكل (6-2) السابق.

ولأن المحولات المثالية (Ideal Transformers) غير موجود بالواقع وذلك لوجود ضياعات داخل



الشكل رقم (6-4)

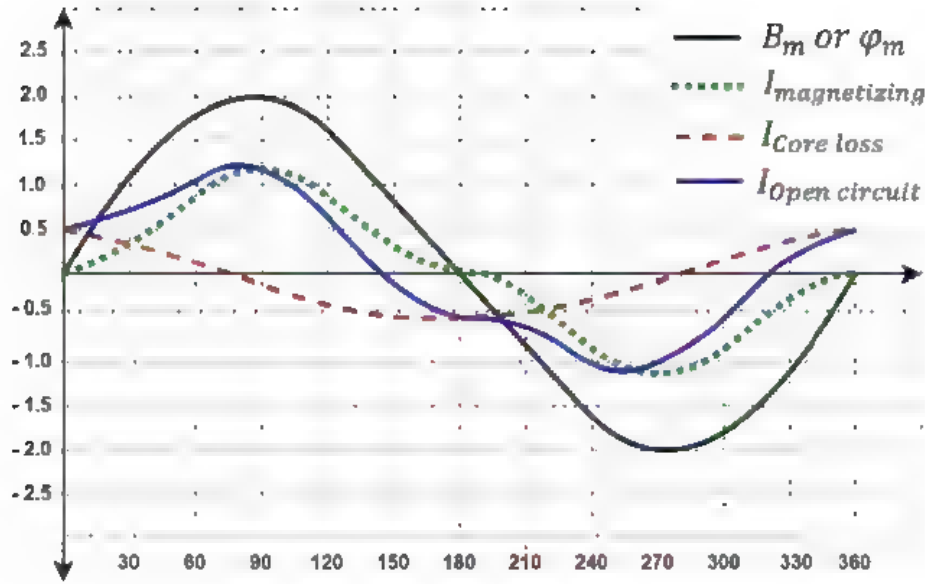
المحول نتيجة للتيارات الدوامية (Eddy currents) في القلب الحديدي وأيضاً لوجود الخاصية الهستيرية (Hysteresis) الناتجة عن تغير اتجاه قطبية جزيئات المادة المكوّنة للقلب الحديدي تبعاً لتغير قطبية الفولتية المُطبقة (AC Voltage) والذي يكون على شكل مغناطيسية متبقية (Residual flux) مما يعني ضياعات إضافية في القوة المغناطيسية داخل القلب

الحديدي، وبعد تطبيق الفولتية المترددة على الملفات الابتدائية فهناك مُركبة تيار أخرى تنشأ بالإضافة إلى تيار التهيج أو المعنطة (I_m) سابق الذكر وهو تيار ضياعات القدرة أو القلب (Power/Core Loss current) أو ما يُسمى أيضاً بتيار الضياعات الثابتة (Fixed Loss current) ويُرمز له بالرمز (I_c) ويكون مُزاح مُتجهياً بمقدار ($+90^\circ$) عن الفيض المغناطيسي (ϕ_m) ومُطابق مُتجهياً (in-phase) للقوة الدافعة الكهربائية ($-E_1$) وذو قيمة أقل من تيار التهيج المعنطة (I_m) كما هو مبين بالشكل (6-4)، والمجموع المُتجهي (Vector sum) لهذين التيارين (I_c) و (I_m) يُساوي تيار اللاحمل أو الدائرة المفتوحة (No-Load/Open Circuit current - I_0) والذي يكون مُزاح مُتجهياً عن الفيض المُشترك (ϕ_m) بزاوية تُسمى زاوية الضياعات (Loss Angle - δ)، ومُزاح متجهياً عن القوة الدافعة الكهربائية بزاوية تُسمى زاوية الطور (Phase Angle - φ)، ويكون أيضاً ذو قيمة قليلة إذ يتراوح مقداره (3% - 1%) من التيار الإسمي للمحول الكبيرة.

$$I_{Open\ circuit} = I_{magnetizing} + I_{Core\ loss}$$

حيث أن:

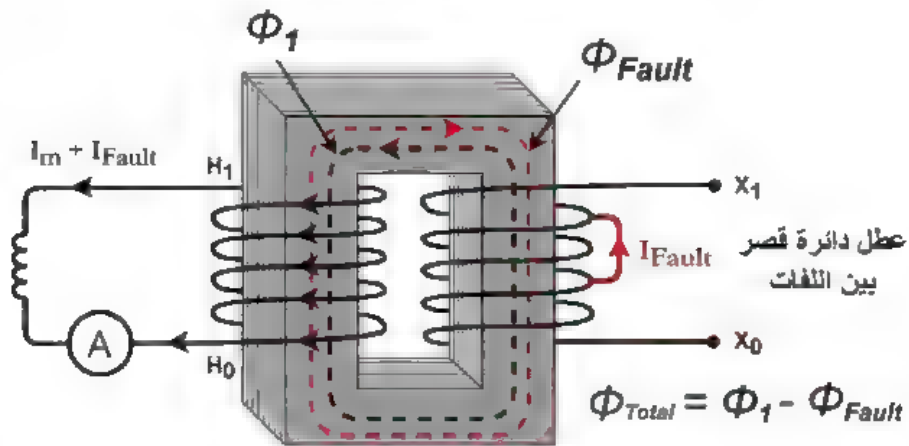
$$I_{Core\ loss} = I_{Eddy} + I_{Hysteresis}$$



الشكل رقم (6-5)

- كيف يَدُل هذا الفحص على وجود مشكلة في العزل بين اللقات وكذلك مشاكل القلب الحديدي للمحول:

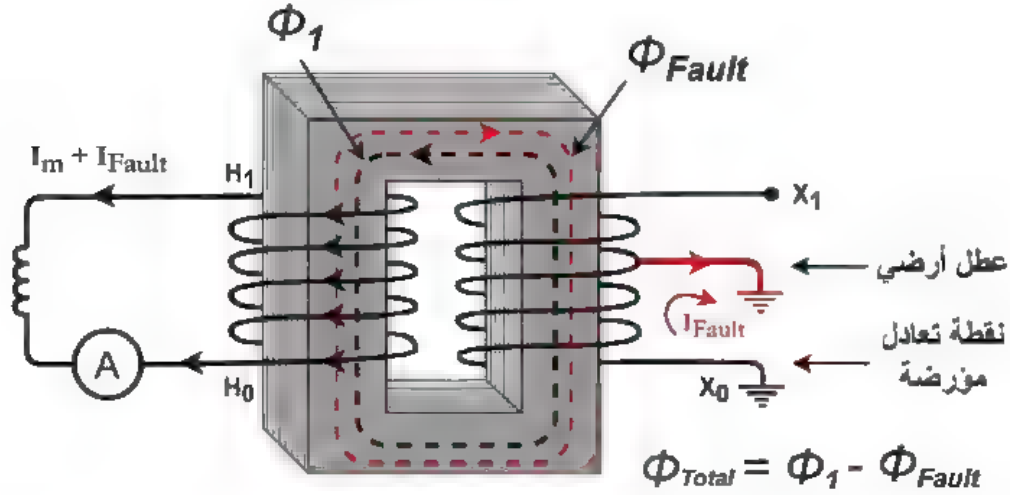
في ثنايا شرح فلسفة الفحص تمت الإجابة عن هذا التساؤل بالكامِل بشكل غير مباشر، فكما دُكر سابقاً فإن قيمة التيار في الملفات الابتدائية (I_1) تعتمد على قيمة التيار في الملفات الثانوية (I_2)، لذلك عند تطبيق فولتية مترددة على ملفات المحول الابتدائية مع مراعاة فتح أطراف الملفات الثانوية (كما هو الحال في هذا الفحص) يكون التيار في الملفات الثانوية (I_2) مساوٍ للصفر مما يعني أن التيار في الملفات الابتدائية سيكون مساوٍ لـ (I_0) وهو تيار التهييج أو اللاحمل فقط.



الشكل رقم (6-6)

أما في حال حدوث قصر بين لفات الملفات الثانوية (Turn to turn fault) كما هو مبين في الشكل (6-6) أو حدوث قصر بين لفات الملف الثانوي والأرض كما هو مبين في الشكل (6-7)، فإنه سيُنتج عن هذا القصر تيار يسري في الملفات الثانوية (I_2) أي أنه سيصبح للتيار (I_2) قيمة غير مساوية للصفر وسرمر لها بـ (I_{fault})، ونتيجة لذلك فإن هذا التيار سوف يُنتج فيض عطل (ϕ_{fault}) معاكس للفيض الابتدائي (ϕ_1)

أو (ϕ_m) خافضاً قيمة الـ (E_1) ورافعاً قيمة الفولتية على أطراف الملفات الابتدائية (V_{net}) الناتجة عن $(V_1 - E_1)$ ، ويتلازم مع ما سبق إرتفاع في قيمة تيار التهيج في الملفات الابتدائية (I_0) إضافة مركبة تيار جديده لتيار التهيج مع بقاء قيمة تيار التهيج ثابتة - وهذا بدوره يدل على وجود هذا النوع من الأعطل (القصر بين اللفات) في ملفات المحول الثانوية.



الشكل رقم (6-7)

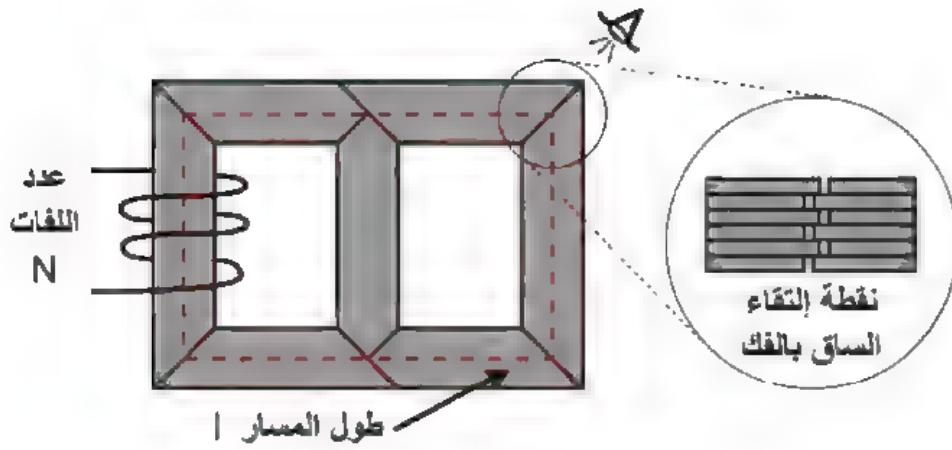
وكذلك الحال عند حدوث عطل في القلب الحديدي (Iron core) أدى الى إرتفاع قيمة ممانعة القلب $(\xi - \text{Reluctance})$ لسريان الفيض المغناطيسي (ϕ_1) أو (ϕ_m) كحدوث تغيير في تركيبة القلب الحديدي للمحول ناتج عن تغيير للطول المسار الحامل للمغناطيسية أو تغيّر في مساحة مقطع القلب الحديدي وفقاً للمعادلة التالية التي تُبين أن أي تغيير فيزيائي (ميكانيكي) لتركيب القلب الحديدي سينعكس على قيمة ممانعة القلب $(\xi - \text{Reluctance})$.

$$\xi = l / \mu A \quad (6.10)$$

حيث:

- ξ : ممانعة القلب الحديدي لمرور الفيض المغناطيسي (Reluctance).
- l : طول المسار المغناطيسي داخل القلب الحديدي.
- A : مساحة المقطع العرضي للقلب الحديدي.
- μ : النفاذية المغناطيسية للمادة المكوّنة للقلب الحديدي (Permeability).

بالإضافة إلى أي تغيير قد يحدث على نقطة الإتصال بين الساق (Limb) و الفك (Yoke) حيث تمثل هذه النقطة المكان الأكثر تأثيراً على قيمة ممانعة القلب الحديدي لسريان الفيض المغناطيسي.



الشكل رقم (6-8)

وهذا التغير في قيمة مُمانعة القلب الحديدي (ξ - Reluctance) يؤدي إلى إرتفاع في قيمة تيار التهيج في الملفات الابتدائية (I_0) - إضافة مركبة تيار جديدة لتيار التهيج مع بقاء قيمة تيار التهيج ثابتة - وفقاً للمعادلة (6.11) التالية للحفاظ على قيمة الفيض المغناطيسي الإسمي للمحول (ϕ_1) أو (ϕ_m) ثابتة، مما وهذا بدوره يَدُل على وجود عطل في القلب الحديدي (Iron core) للمحول.

$$\phi_m = \frac{mmf}{\xi} = \frac{N \cdot I}{\xi} \quad (6.11)$$

حيث:

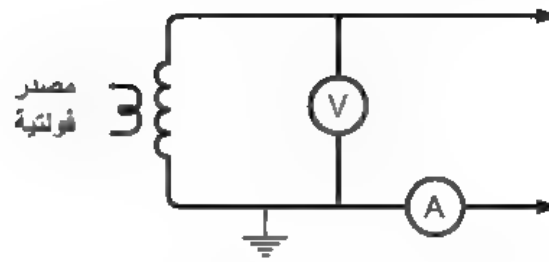
- mmf : القوة الدافعة المغناطيسية (Magnetomotive Force)
- ϕ_m : الفيض المغناطيسي المشترك.
- ξ : مُمانعة القلب الحديدي لمرور الفيض المغناطيسي (Reluctance).
- N : عدد الملفات.
- I : التيار.

4. طرق الفحص

هنالك عدة طرق يُمكن من خلالها إجراء هذا الفحص بحيث يتم إعتداد الطريقة وفقاً للتجهيزات الموجودة بالموقع وتوافرية المُعدات اللازمة لهذا الفحص:

4.1 الطريقة التقليدية:

تُعد هذه الطريقة الأبسط في قياس تيار التهيج وذلك بإستخدام مصدر فولتية مترددة آحادي الطور ذو فولتية تصل (10kV) كيلوفولت وتردد (50Hz) هيرتز مع دائرة لقياس التيار بالملي أمبير (mA)، بحيث تُتيح دائرة الفحص تطبيق أسلوب العينة غير المؤرضة (UST) أي قياس التيار الراجع في دائرة الفحص (LV cable) وأي تيارات أخرى يتم تحيدها عبر الـ (Ground Guard) كما هو مُبين بالشكل (6-9) الذي يوضح دائرة فحص مُبسطة مكونة من مصدر فولتية ومقياس فولتية وتيار.

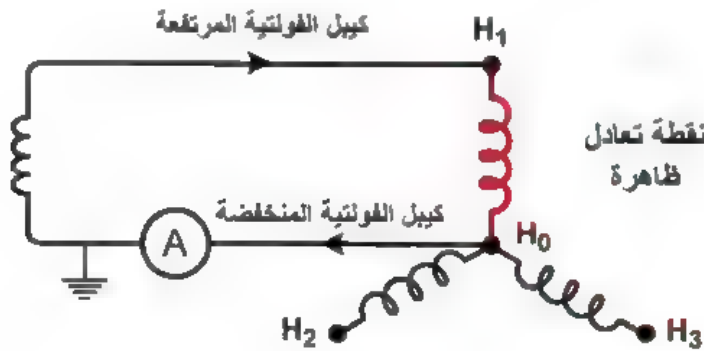


الشكل رقم (6-9)

وتعتمد طريقة توصيل مصدر الفولتية بالمحول على نوع توصيلة ملفات المحول الداخلية كالآتي:

- ملفات محول موصولة على شكل نجمة (Star - Y) ذات نقطة تعادل (Neutral point) يُمكن الوصول إليها (ظاهرة).

الشكل (6-10) يوضح توصيلة مصدر الفحص بملفات محول موصولة على شكل نجمة (Star - Y) ذات نقطة تعادل (Neutral point) يُمكن الوصول إليها (ظاهرة).



الشكل رقم (6-10)

الجدول (6-1) يُبين الأطراف التي يجب حقنها بالفولتية المترددة والأطراف الواجب تأريضها بالإضافة للأطراف الواجب تركها مفتوحة.

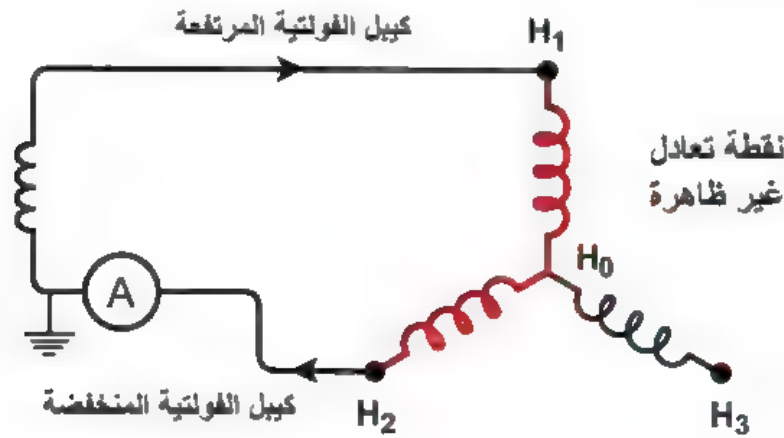
الجدول رقم (6-1)

أطراف الحقن	أطراف القياس	أسلوب الفحص	الأطراف المؤرضة	الأطراف المفتوحة
H1	H0	UST	X0* Y0*	H2H3 X1X2X3 Y1Y2Y3
H2	H0	UST	X0* Y0*	H1H3 X1X2X3 Y1Y2Y3
H3	H0	UST	X0* Y0*	H1H2 X1X2X3 Y1Y2Y3

* في الجدول السابق وفي حال كانت ملفات المحول الثانوية (الفولتية، المنخفضة) موصولة على شكل نجمة (Star - Y) يجب الإبقاء على حالة نقطة التعادل (X0) و/أو (Y0) أثناء الفحص مؤرضة كما هي بوضع التشغيل لطبيعي للمحول، أي تأريضها إذا كانت إذا كانت مؤرضة وتركها مفتوحة إذا كانت كذلك.

• ملفات محول موصولة على شكل نجمة (Star - Y) ذات نقطة تعادل (Neutral point) لا يُمكن الوصول إليها (غير ظاهرة).

الشكل (6-11) يوضح توصيلة مصدر الفحص بملفات محول موصولة على شكل نجمة (Star - Y) ذات نقطة تعادل (Neutral point) لا يُمكن الوصول إليها (غير ظاهرة).



الشكل رقم (6-11)

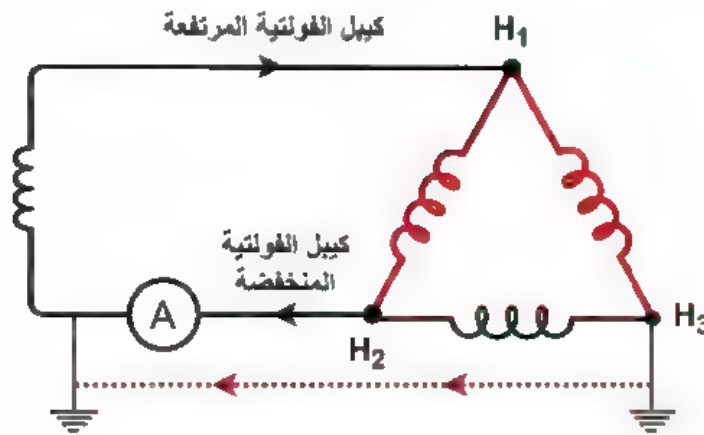
الجدول (6-2) يبين الأطراف التي يجب حقنها بالفولتية المترددة والأطراف الواجب تأريضها بالإضافة للأطراف الواجب تركها مفتوحة.

الجدول رقم (6-2)

أطراف الحقن	أطراف القياس	أسلوب الفحص	الأطراف المؤرضة	الأطراف المفتوحة
H1	H2	UST	X0* Y0*	H3 X1X2X3 Y1Y2Y3
H2	H3	UST	X0* Y0*	H1 X1X2X3 Y1Y2Y3
H3	H1	UST	X0* Y0*	H2 X1X2X3 Y1Y2Y3

* في الجدول السابق وفي حال كانت ملفات المحول الثانوية (الفولتية، المنخفضة) موصولة على شكل نجمة (Star - Y) يجب الإبقاء على حالة نقطة التعادل (X0) و / أو (Y0) أثناء الفحص كما هي بوضع التشغيل الطبيعي للمحول، أي تأريضها إذا كانت إذا كانت مؤرضة وتركها مفتوحة إذا كانت كذلك.

- ملفات محول موصولة على شكل مثلث (Delta - Δ) الشكل (6-12) يوضح توصيلة مصدر الفحص بملفات محول موصولة على شكل مثلث (Delta - Δ).



الشكل رقم (6-12)

الجدول (6-3) يُبين الأطراف التي يجب حقنها بالفولتية المترددة والأطراف الواجب تأريضها بالإضافة للأطراف الواجب تركها مفتوحة.

الجدول رقم (6-3)

أطراف الحقن	أطراف القياس	أسلوب الفحص	الأطراف المؤرضة	الأطراف المفتوحة
H1	H2	UST	H3 X0*, Y0*	X1X2X3 Y1Y2Y3
H2	H3	UST	H1 X0*, Y0*	X1X2X3 Y1Y2Y3
H3	H1	UST	H2 X0*, Y0*	X1X2X3 Y1Y2Y3

* في حال كانت ملفات المحول الثانوية (الفولتية المنخفضة) موصولة على شكل نجمة (Star Y) يجب الإنقاء على حالة نقطة التعادل (X0) و / أو (Y0) أثناء الفحص كما هي بوضع التشغيل الطبيعي للمحول، أي تأريضها إذا كانت إذا كانت مؤرضة وتركها مفتوحة إذا كانت كذلك.

4.2 الفحص بواسطة أجهزة الفحص الحديثة وعادة ما يتم إجراء هذا الفحص باستخدام أجهزة الفحص نفسها المستخدمة في فحص معامل التبديد/القدرة. الملحق (6-1) يوضح خطوات الفحص المبسطة باستخدام جهاز الفحص (Delta 2000) المُصنَّع بواسطة شركة (MEGGER).

5. خطوات الفحص

بعد التعرف على فلسفة الفحص وطرق إجراؤه والتوصيلات اللازمة لذلك، يُمكن البدء بخطوات الفحص كالآتي:

5.1 عزل المحول كهربائياً (Transformer De-energization) مع مراعاة تطبيق نظام (إقفال مصادر

الطاقة ووضع لافتات عليها) أو ما يُسمى بنظام التقافل (Lock-out Tag-out LOTO).

5.2 عزل نظام مكافحة الحريق بالماء (أو كما يُسمى نظام تبريد خزان المحول ومنع إنتشار الحريق) الخاص

بالمحول المُراد فحصه خشية عمل النظام بشكل خاطئ أثناء إجراء الفحص مما قد يؤدي لمخاطر القوس الكهربائي وما ينطوي عليه من مخاطر على الأشخاص أو المحول خاصة أثناء تطبيق الفولتية على المحول أو قد يؤدي الماء لتلف جهاز الفحص نفسه.

5.3 تطبيق كافة إجراءات السلامة الخاصة بإجراء الفحوصات الكهربائية المُضمنة في معايير معهد

مهندسي الكهرباء والإلكترونيات - [IEEE Recommended Practices for Safety in High-

Voltage and High-Power Testing] و المعهد الوطني الأمريكي للمعايير [ANSI National

Electrical Safety Code] و مُنظمة إدارة السلامة والصحة المهنية [OSHA Specifications

for Accident Prevention Signs and Tags]

5.4 فتح أطراف الفولتية المنخفضة (LV side terminals) والفولتية المرتفعة (HV side terminals)

وذلك بإزالة الموصلات عنها (Removing HV&LV Cables or Busbars) وكذلك الحال نقطة التعادل (Neutral point) الخاصة بالملفات التي سيتم تطبيق الفولتية عليها إن وجدت (عادةً ملفات الفولتية المرتفعة)، مع مراعاة ترك نقطة التعادل (Neutral point) الخاصة بالملفات ذات الدائرة المفتوحة موصولة بالأرض (عادةً ملفات الفولتية المنخفضة).

5.5 تفريغ الشحنات المُحزنة بملفات المحول (Trapped Charges) قبل توصيل كوابل الفحص وذلك

بعمل دائرة قصر للملفات (Short circuit) وتأريضها لمدة من الزمن وكذلك الحال بعد الإنتهاء من الفحص وقبل إزالة كوابل الفحص. بالإضافة إلى تأريض خزان المحول أثناء إجراء الفحص.

تحذير: يكون تأريض كوابل الفولتية المرتفعة إما عبر مُستعزلات التأريض الثابتة

(Earthing Dis-connector) أو المتنقلة (Portable) قبل البدء بفك هذه الكوابل

عن عوازل إحتراق المحولات (Bushings)، وذلك لما قد تحويه من فولتية حثية

(Induction voltage) ناتجة عن المُعدات أو الخطوط الهوائية (Overhead Lines)

(- OHL) المجاورة للمحول المُراد فحصه والمشحونة بفولتيات مرتفعة.



5.6 في حال سبق إجراء هذا الفحص إجراء أي من الفحوصات التي تعتمد على الفولتية الثابتة (DC) مثل

فحص مقاومة العازل (Insulation resistance) أو فحص مقاومة الملفات (Winding

Resistance) يجب إزالة المغناطيسية المُتبقة (De-magnetization) بالطرق الواردة في نهاية

الفحصين سابقين الذكر (الفصل الثاني و الثالث)، وذلك لأن نتيجة هذا الفحص تتأثر بشكل كبير بقيمة المغناطيسية المُتبقة وتشتت القلب الحديدي للمحول.

5.7 تحديد وضعية مُغَيِّر الخطوة (Tap changer):

يُصبح بإجراء هذا الفحص لأسباب تشخيصية على وضعيات مُغَيِّر الخطوة (Tap changer) التالية:

- ✓ على جميع خطوات (Taps) مُغَيِّر الخطوة من النوع (OLTC).
- ✓ خطوة المنتصف أو خطوة التعادل بالإضافة إلى خطوة لأعلى وخطوة لأسفل عن نقطة التعادل لمُغَيِّر الخطوة من النوع (OLTC) هذا كما ورد في المعيار الصادر عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE, C57.152-2013].
- ✓ الخطوة التشغيلية الإعتيادية أي التي كان عليها المحول أثناء عمله الطبيعي في حال كان مُغَيِّر الخطوة من النوع (DETC or OCTC).

وفي حال أردنا تحليل نتائج هذا الفحص عن طريق ملاحظة التباين بين الأطوار أي مقارنة نتائج الفحص بين الأطوار الثلاثة (Phase Pattern) كما سيتم شرحه لاحقاً في فقرة تحليل نتائج الفحص، فإنه يتم الإكتفاء بإجراء هذا الفحص عند خطوة مُحددة من خطوات مُغَيِّر الخطوة (Tap changer) وعادةً ما تكون الخطوة المرجعية أو التشغيلية، أما في حال أردنا تحليل نتائج الفحص عبر ملاحظة نمط التباين بين الخطوات المختلفة لمُغَيِّر الخطوة (Tap changer Pattern) فإنه يُصبح بإجراء هذا الفحص على جميع الخطوات (Tap).

5.8 عمل التوصيلة الخاصة بهذا الفحص كما هو مبين في الشكل (6-10) للملفات الموصولة على شكل مثلث نجمة (Star - Y) بنقطة تعادل ظاهرة ويُمكن الوصول إليها، أو الشكل (6-11) للملفات الموصولة على شكل نجمة (Star Y) بنقطة تعادل غير ظاهرة ولا يُمكن الوصول إليها، أو الشكل (6-12) للملفات الموصولة على شكل (Delta - Δ).

5.9 تحديد فولتية الفحص:

يجب إجراء هذا الفحص عند مستوى فولتيات مرتفع بحيث لا يتعدى قيمة الفولتية الإسمية (L-L) لملفات المحول الموصولة على شكل مثلث (Delta - Δ)، وأن لا يتعدى قيمة الفولتية الإسمية (L-N) لملفات المحول الموصولة على شكل نجمة (Star - Y)، حيث أن السخنة القصصية من هذا الفحص عادة ما يتم إجراؤها عند مستوى فولتية مقداره (100%) بالمئة أو (110%) بالمئة من الفولتية الإسمية، ونظراً لصعوبة الحصول على فولتية فحص مرتفعة في الموقع عادة ما يتم الإكتفاء بإجراء هذا الفحص على فولتيات متدنية قرابة (10kV) كيلوفولت أو أقل (2.5kV) كيلوفولت أو كما يتيح جهاز الفحص، ومن ثم يتم تصحيحها داخلياً في جهاز الفحص إلى الفولتية المُراددة.

ملحوظة (6-1): في حال ظهور تيار تهبيج مرتفع يفوق قدرة الخرج لجهاز الفحص فإن أجهزة الفحص الحديثة سوف توقف الفحص تلقائياً، عندها يُمكن تقليل فولتية الفحص وإعادة الفحص مرة أخرى. وعادة ما يظهر تيار التهبيج المرتفع عند فحص محولات التوزيع قليلة السعة أو في حال وجود أعطال قصر بين الملفات أو في حال كان نوع مُغَيِّر الخطوة (Reactive OLTC) عند لحظة الـ (Bridging) كما سيتم شرحه لاحقاً.



5.10 البدء بالفحص وفقاً للخطوات المبينة في الملحق (6-1) الخاص بجهاز الفحص (DELTA2000) المُصنَّع بواسطة شركة (MEGGER).

6. تصحيح القيمة المُقاسة

تعتمد قيمة تيار التهيج على قيمة فولتية الفحص لذلك عند مقارنة هذا الفحص بفحوصات سابقة لنفس المحول يجب التأكد من أنها تم إجراؤها عند نفس مستوى الفولتية، ولكن في حال إختلاف قيمة فولتية الفحص بين الفحوصات السابقة والحالية فإنه يصعب مقارنتها بشكل صحيح، ومما يزيد الأمر صعوبة أن تيار التهيج لا يرتبط بشكل حطي مع مقدار فولتية الفحص لذلك يصعب تصحيحها حسابياً.

تقوم أجهزة الفحص الحديثة بتصحيح القيمة المُقاسة تلقائياً عند أي فولتية فحص إلى الفولتية (10kV) كيلو فولت داخلياً ليتسنى تحليلها ومقارنتها بسهولة ويُسر.

7. تحليل نتائج الفحص

يُعد فحص تيار التهيج (Excitation current) من الفحوصات التي لا تعتمد على وُحود قِيَم مرجعية (Reference value) أو نتائج فحوصات سابقة ليتم المقارنة بها بشكل رئيسي، ولتحليل نتائج هذا الفحص لا بُد من معرفة الأنماط الشائعة للقيَم الناتجة عن هذا الفحص والتي تنقسم لنوعين رئيسيين؛ الأول عند مقارنة نتيجة الفحص أحادي الطور بين الأطوار وهو ما يُسمى بنمط الطور (Phase Pattern)، والثاني تبعاً لنوع مُغَيِّر الخطوة وهو ما يُسمى بنمط مُغَيِّر الخطوة (Tap changer Pattern)، بحيث يتم تطبيق هذه الانماط على تيارات التهيج بالإضافة إلى حسائر القدرة أيضاً (Watt loss):

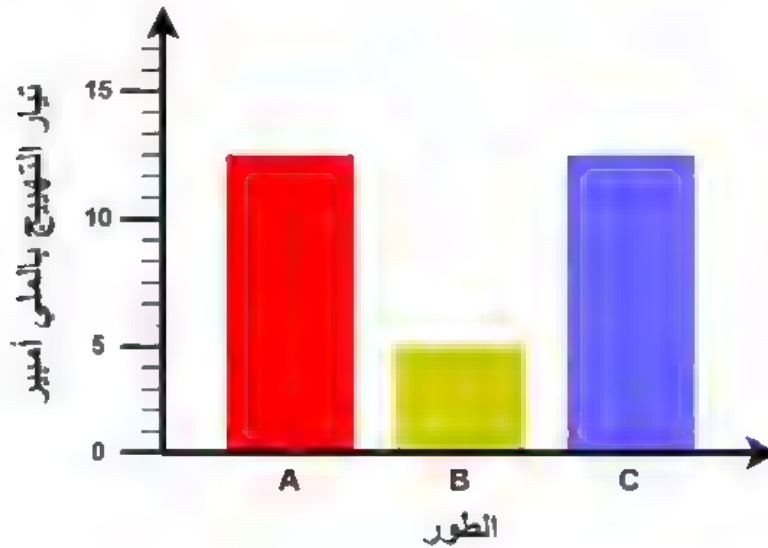
7.1 المقارنة بين الأطوار المختلفة مع ثبات فولتية الفحص وخطوة مُغَيِّر الخطوة (Tap changer) وهذا ما يُسمى بنمط الطور (Phase Pattern).

عند إجراء هذا الفحص على أطوار المحول المُختلفة كلاً على حدا، تظهر مجموعة من أنماط القراءات لتيار التهيج والتي من خلالها يتم تحليل نتائج هذا الفحص وتُسمى هذه الأنماط بأنماط الطور (Phase Patterns)، وتتأثر هذه الأنماط بشكل كبير بالمحاثة المغناطيسية للقلب الحديدي ومماثته المغناطيسية (Reluctance) لمرور الفيض المغناطيسي والتي تعتمد بشكل رئيسي على تركيب القلب الحديدي. وتنحصر هذه الأنماط بالأنماط الخمسة الآتية:

• النمط الأول: مرتفع - منخفض - مرتفع (H - L - H)

في هذه النمط تكون قراءات تيار التهيج للملفات الموجودة على أطراف القلب الحديدي متساوية وأكبر من قيمة تيار التهيج لملفات الطور الأوسط لذلك يُرمز لهذا النمط (H-L-H) كما هو مُبين بالشكل (6-13)، و بالرجوع إلى السُفرة التقنية الصادرة عن المجلس الدولي للأنظمة الكهربائية الكبيرة [CIGRE, Guide for Transformer Maintenance 445] فإنه عادةً ما تكون قيمة التباين في التيار للطورين المُفترض أن تكون قيمتهما متقاربة قرابة الـ (5%) بالمئة و يكون مقدار تيار التهيج للطور الأوسط أقل منهما قرابة الـ (30%) بالمئة. أما الكتاب [Jill C. Duplessis, Electrical Field Tests for the Life Management of Transformers] فقد أورد قيمة تباين لقيمة تيار التهيج بين الطورين المُفترض أن قيمتهما متقاربة قرابة الـ (10%) بالمئة في حال كانت قيمة تيار التهيج لا تزيد عن أو تساوي (50mA) ملي

أمبير وما مقداره (5%) في حال كانت قيمة تيار التهيج تزيد عن (50mA) ملي أمبير. وأي قيمة تباين أكبر من تلك المذكورة أعلاه فإنها تدعو للبحث المُعمَّق وراء إختلاف قيمة هذه التيارات والتي قد تقود لإكتشاف الأعطال داخل المحول.

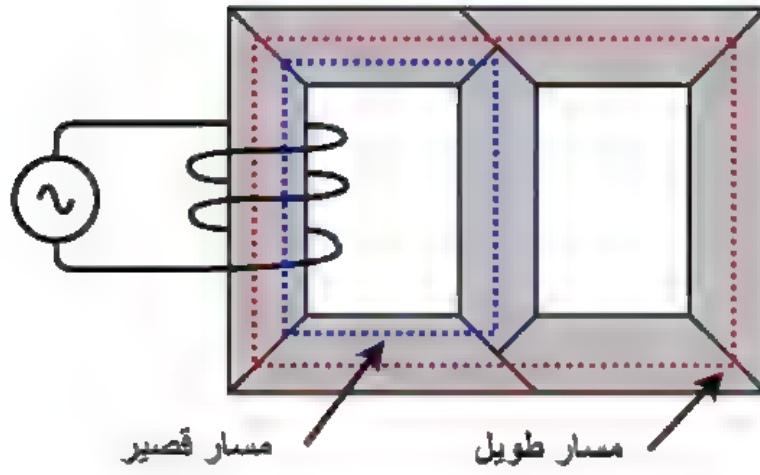


الشكل رقم (6-13)

ويُتوقع أن يظهر هذا النمط من قراءات تيار التهيج عند فحص المحولات في الحالات التالية:

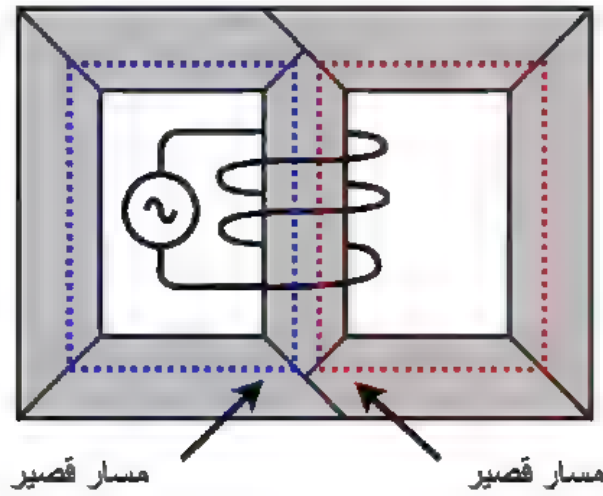
- ✓ محول ذو قلب حديدي ثلاثي الأعمدة (Core type) ملفاته موصولة على شكل مثلث (Delta - Δ) كما هو مبين بالشكل (6-12).
- ✓ محول ذو قلب حديدي ثلاثي الأعمدة (Core type) ملفاته موصولة على شكل نجمة (Star - Y) ذات نقطة تعادل (Neutral point) يُمكن الوصول لها (ظاهرة) كما هو مبين بالشكل (6-10).
- ✓ محول ذو القلب حديدي خماسي الأعمدة (Shell type) ملفاته موصولة على شكل مثلث (Delta - Δ).

ويعود سبب الحصول على هذا النمط من القراءات (H-L-H)، إلى أن مقدار تيار التهيج كما ذكر سابقاً يتناسب طردياً مع مُمانعة القلب الحديدي ($\text{Reluctance} - \text{R}$) والتي تعتمد بدورها على تركيب القلب الحديدي كطول الفك (Yoke) والعمود (Limb) كما هو مبين بالمعادلة (6.10) والشكل (6-8). لذلك فإنه عند تطبيق فولتية مترددة على ملفات الأطوار المثبتة على عمود (Limb) القلب الحديدي الخارجي أي عادة الطور (A) أو (C)، ينشأ مسارين للفيض المغناطيسي المُتكوّن في القلب الحديدي بحيث يكون أحدهما قصير والآخر طويل كما هو مبين بالشكل (6-14).



الشكل رقم (6-14)

أما عند تطبيق فولتية مترددة على ملفات الطور المُثَبَّت على عامود (Limb) القلب الحديدي الأوسط أي عادة الطور (B)، ينشأ مسارين قصيرين للفيض المغناطيسي المُتكوّن كما هو مُبين بالشكل (6-15).

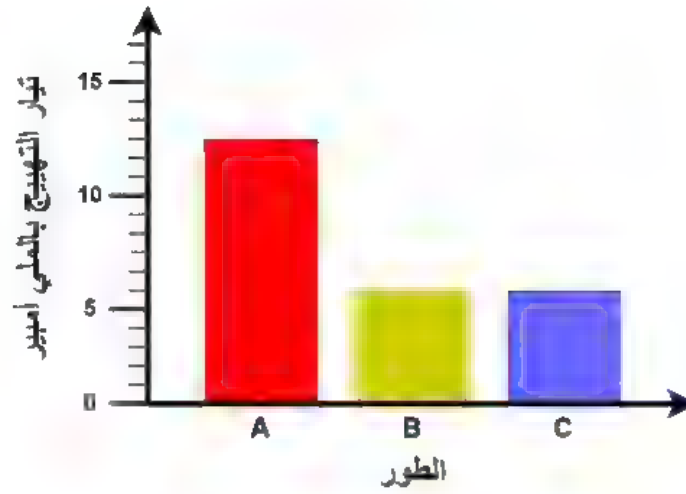


الشكل رقم (6-15)

وبمقارنة الشكل (6-14) بالشكل (6-15) فإنه يُمكن ملاحظة أن طول المسار (l) الذي سيسلكه الفيض المغناطيسي في حال تطبيق الفولتية على الملفات التي على الأطراف أكبر من طول المسار الذي سيسلكه عند تطبيق الفولتية على الطور الأوسط مما يُفسر إزدیاد مُمانعة القلب (**Reluctance**) لمرور الفيض المغناطيسي ويؤدي لزيادة قيمة تيار التهيج المُتكوّن في الملفات على الأطراف، والعكس بالعكس عند تطبيق الفولتية على الملف الأوسط.

• النمط الثاني: مرتفع - منخفض - منخفض ($H - L - L$)

في هذه النمط تكون قراءات تيار التهيج متساوية لطورين من أطوار المحول والطور الثالث تكون قيمته أكبر منهما لذلك يُرمز لهذا النمط ($H - L - L$) كما هو مُبين بالشكل (6-16)، حيث يُسمح بنسبة تباين بين قِيم تيارات الطورين المتساويين بالقيمة ($L - L$) قرابة (10%) وأي قيمة تباين أكبر من ذلك تدعو للبحث المُعمّق وراء إختلاف قيمة هذه التيارات والتي قد تقود لإكتشاف الأعطال داخل المحول.



الشكل رقم (6-16)

ويُتَوَقَّع أن يظهر هذا النمط من قراءات تيار التهييج عند فحص محول ذو قلب حديدي ثلاثي الأعمدة (Core type) ملفاته موصولة على شكل نجمة (Star - Y) ذات نقطة تعادل (Neutral point) لا يُمكن الوصول إليها أي أنه موصول على شكل نجمة داخلياً وتكون نقطة التعادل غير ظاهرة كما هو مبين بالشكل (6-11).

ويعود سبب الحصول على هذا النمط من القراءات (H-L-L)، إلى عدم إمكانية إجراء القياسات بشكل أحادي الطور (Single phase measurements) ولا بد من تطبيق العولتية على طورين موصولين على التوالي كما هو مبين بالشكل (6-11)، فكما تم شرحه في النمط السابق (H-L-H) أن الطور الأوسط (B) يكون ذو قيمة تيار تهيج أقل لذلك في حال وصله على التوالي مع أحد الطورين الآخرين (A - B) و (B - C) فإنه سيؤدي لإنخفاض قيمة تيار التهيج الكلية عن قيمة تيار التهيج عند القياس على الطورين (A - C) وهذا بدوره يُفسر ظهور هذا النمط من قراءات تيار التهيج (H-L-L).

والحدول (6-4) يُبين ظهور هذا النمط عند فحص محول ذو مجموعة توصيل (Yd1).

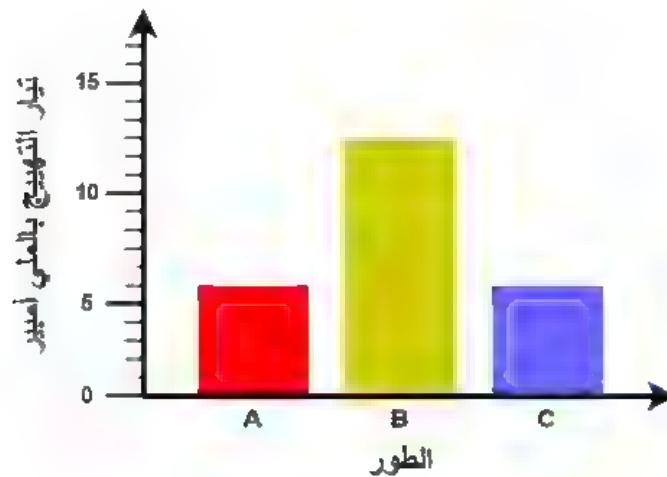
الجدول رقم (6-4)

الطور المُقاس	توصيلة الفحص	التيار المُتوقع حسب الطور	التيار الكلي المُتوقع
A و B	H1 - H3	مرتفع + مرتفع	مرتفع
A و B	H2 - H1	منخفض + مرتفع	منخفض
B و C	H3 - H2	مرتفع + منخفض	منخفض

• النمط الثالث: منخفض - مرتفع - منخفض (L - H - L)

في هذه النمط تكون قراءات تيار التهيج للملفات الموجودة على أطراف القلب الحديدي تقريباً متساوية وأقل من قيمة تيار التهيج لملفات الطور الأوسط لذلك يُرمز لهذا النمط (L-H-L) كما هو مبين بالشكل (6-17) كما ويُعدّ هذا النمط أقل شيوعاً على النقيض من الأنماط سابقة الذكر، إذ أنه من غير المتوقع الحصول على هذا النمط عند فحص محول قدرة (Power Transformer) ولكن يُمكن الحصول عليه

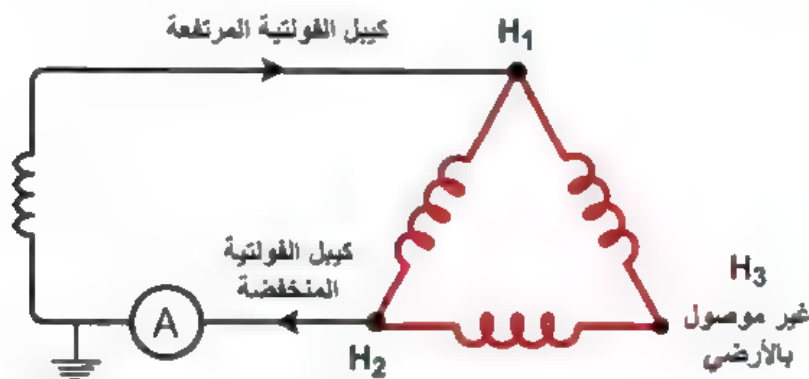
عدد فحص محول توزيع (Distribution Transformer) ذو سعة (Capacity) مُتدنية أقل من (3MVA) ميجافولت أمبير.



الشكل رقم (6-17)

ويُتوقع أن يظهر هذا النمط من قراءات تيار التهيج عند فحص محولات التوزيع كما ذكر سابقاً بالإضافة للحالات التالية:

✓ محول ذو قلب حديدي ثلاثي الأعمدة (Core type) ملفاته موصولة على شكل مثلث (Delta Δ)، ولخطب ما لم يتم توصيل الطرف الثالث مع الأرضي عند إجراء الفحص كما هو مُبين بالشكل (6-18). (خطأ في توصيلة الفحص)



الشكل رقم (6-18)

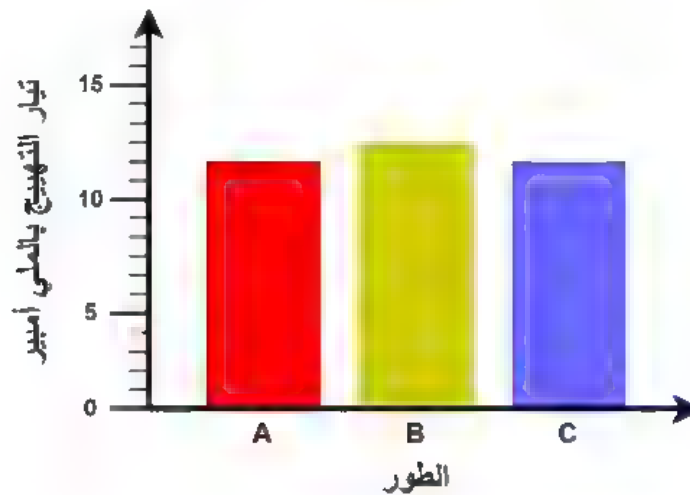
✓ محول ذو قلب حديدي ثلاثي الأعمدة (Core type) ملفاته موصولة على شكل نجمة (Star - γ) ذات نقطة تعادل (Neutral point) لا يُمكن الوصول لها (غير ظاهرة). حيث أنه في هذه الحالة لم يُعد الفحص أحادي الطور (Single phase) بل أصبح ثنائي الطور وذلك لأن أطراف الفحص في هذه الحالة (H1 - H2) و (H1 - H3) و (H2 - H3) مما يعني تطبيق الفولتية على طورين بنفس الوقت كما هو مبين بالشكل (6-11) كما تم شرحه في النمط السابق.

✓ محول ذو قلب حديدي رباعي الأعمدة كبعض المحولات التلقائية (Autotransformers) المُصنعة بالولايات المتحدة الأمريكية.

لذلك عند الحصول على هذا النمط عند فحص محول قدرة (Power transformer)، فإنه بالغالب يدل على وجود عطل داخلي بالمحول، أما في حال فحص محول توزيع (Distribution transformer) فمن المُرجح الحصول على هكذا نمط وليس بالضرورة أن يكون دليل على وجود عطل داخلي في المحول

• النمط الرابع: مرتفع - مرتفع - مرتفع (H - H - H)

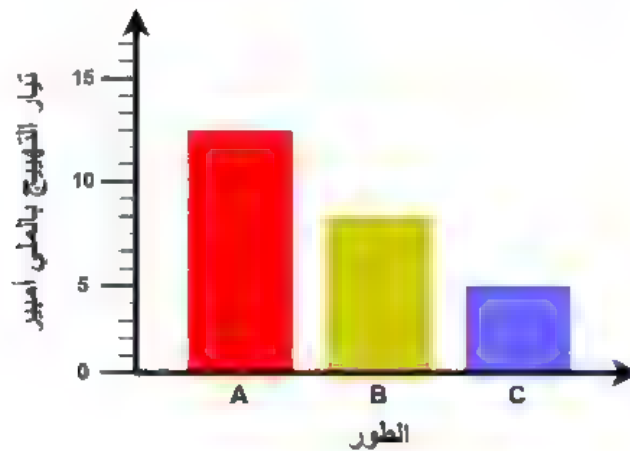
في هذه النمط تكون قراءات تيار التهيج متساوية لجميع الأطوار لذلك يُرمز لهذا النمط (H-H-H) كما هو مبين بالشكل (6-19)، ويُتوقع أن يظهر هذا النمط من قراءات تيار التهيج عند فحص المحولات ذات القلب الحديدي خماسي الأعمدة (Shell type) دو ملعات ثانوي موصولة بغير توصيلة المثلث (Delta Δ).



الشكل رقم (6-19)

• النمط الخامس: مرتفع - متوسط - منخفض (H - M - L)

في هذه النمط تكون قراءات تيار التهيج غير متساوية لجميع الأطوار لذلك يُرمز لهذا النمط (H-M-L)، وأيضاً يُسمى هذا النوع من القراءات باللانمط وذلك لأنها لا تتبع نمط مُعين كما هو مبين بالشكل (6-20).



الشكل رقم (6-20)

لذلك وعند ظهور القراءات بهذا الشكل غير المتساوي بين الأطوار فإنه دليل على واحدة من الأمور التالية:

○ غالبية تيار التهيج ليست حثية.

يتكون تيار التهيج من ثلاث مركبات رئيسية وهي المركبة الحثية والمادية والسعوية، وعادة ما تُهيمن المركبة الحثية للتيار على قيمة التيار الكلي وهذا هو الوضع الطبيعي. ولكن في حال إزدياد مركبة التيار السعوية بحيث تُهيمن على قيمة التيار الكلية فإن هذا من شأنه التأثير على نتائج الفحص وإعطاء قيم تيار غير متساوية.

■ ويبقى التساؤل المطروح كيف يُمكن الكشف عن هذه الحالة؟ وكيفية التعامل معها؟

فيما يخص الشق الأول من السؤال فإن بعض أجهزة الفحص الحديثة خاصة المُصنعة بواسطة شركة (OMICRON) تُعطي قيمة تيار التهيج بالإضافة لزاوية الطور (Phase angle) لهذا التيار، ومنها يُمكن معرفة فيما إذا كان التيار الحثي هو المُسيطر بحيث تكون الزاوية سالبة، أما إذا كان التيار السعوي هو المُسيطر فإن الزاوية ستكون موجبة.

أما فيما يخص الشق الثاني من السؤال فإنه في حال الحصول على نتائج فحص تهيج غير متساوية وعبر قيمة زاوية الطور (Phase angle) ثبت أن المركبة السعوية من التيار هي المُسيطرة، فإنه يتم اللجوء لتتبع نمط خسائر القدرة (Watt loss) والتي تعتمد في قيمتها على قيمة مركبة التيار المادية (Resistive). وفي حال كانت قيمة خسائر القدرة جيدة يُمكن قبول الفحص وجعل قيمته مرجعية للمرات القادمة، أما في حال فشل مقارنة خسائر القدرة أيضاً فإنه يجب البحث أكثر في أسباب عدم تساوي تيارات التهيج والتي قد تقودنا إلى وجود أعطال في المحول.

○ مغناطيسية مُتبقية في القلب الحديدي

في حال وجود مغناطيسية مُتبقية في القلب الحديدي والتي قد تكون ناتجة عن إجراء بعض الفحوصات ذات الفولتية الثابتة (DC voltage) مثل فحص مقاومة العزل (Insulation Resistance) وفحص مقاومة الملفات (Winding resistance) فإنه من المحتمل الحصول على هذا النوع من القراءات غير المتساوية لتيار التهيج، لذلك يُصبح بإجراء هذا الفحص قبل الفحوصات سابقة الذكر وفي حال إجراء هذا الفحص بعدها يجب عمل إزالة لهذه المغناطيسية المُتبقية بالطرق الواردة في نهاية الفصل الثاني والثالث من هذا الكتاب ومن ثم إعادة هذا الفحص مرة أخرى.

○ وجود عطل في المحول

وجود الأعطال من شأنه إعطاء قراءات تيار تهيج غير متساوية والتي تكون عادةً على شكل زيادة في قيمة تيار التهيج على طور واحد أو أكثر، وفي هذه الحالة يجب مقارنة نتيجة الفحص الحالية بنتائج سابقة لنفس المحول مع مراعاة ثبات قيمة فولتية الفحص للفحصين السابق والحالي حتى يتسنى لنا إجراء مقارنة بين نتائج هذه الفحوصات بشكل صحيح. كما ويُنصح بإجراء هذا الفحص على جميع خطوات مُغير الخطوة ومقارنتها بين الخطوات وبناتج الفحوصات السابقة إن أمكن مع مراعاة ثبات فولتية الفحص كما ذكر سابقاً، بالإضافة إلى أن اختلاف مستوى المغناطيسية المُتبقية في القلب

الحديدي بين الفحص السابق والحالي قد يؤدي لإختلاف في قيمة الفحص بشكل طفيف قد لا يؤثر على نتيجة الفحص بحيث يُمكن إهماله.

ملحوظة (6-2): فيما يُخصّ المحولات أحادية الطور (Single Phase) فإنه يتم تحليل نتيجة هذا الفحص بمقارنتها بنتائج فحص سابقة لنفس المحول أو مقارنتها بنتائج فحص محول مشابه في مواصفاته وبيئته التشغيلية.

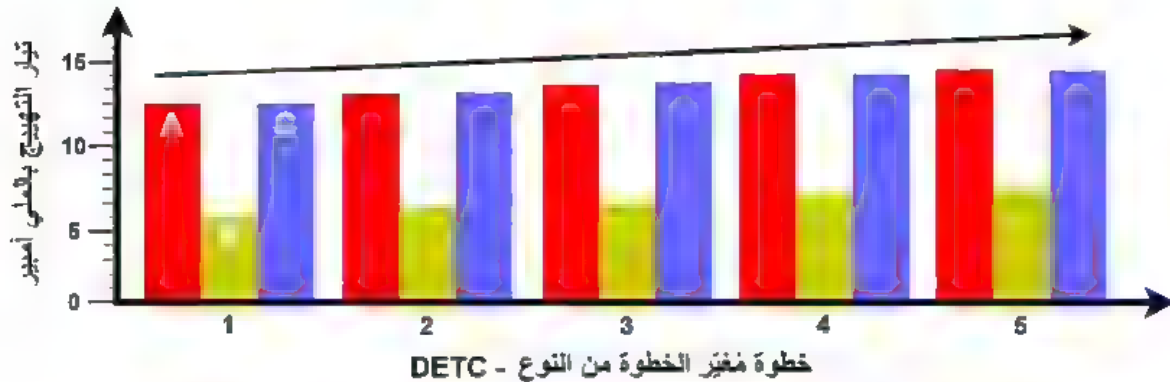


7.2 المقارنة بين نتائج الفحص عند خطوات مُغيّر الخطوة المختلفة مع ثبات فولتية الفحص وهذا ما يُسمى بنمط مُغيّر الخطوة (Tap Changer Pattern).

عند إجراء هذا الفحص عند خطوات مُغيّر الخطوة المُختلفة تظهر مجموعة من أنماط القراءات لتيار التهييج والتي من خلالها يتم تحليل نتائج هذا الفحص، وتُعدّ الأنماط التالية الأكثر شيوعاً:

• النمط الأول: مُغيّر خطوة من النوع (De-Energized Tap Changer - DETC or OCTC)

يظهر هذا النمط من القراءات عند فحص محول ذو مُغيّر خطوة من النوع (DETC أو OCTC)، حيث أن القراءات تردد أو تتناقص بشكل خطي وفقاً لتغيير وضعية مُغيّر الخطوة صعوداً أو نزولاً كما هو مبين بالشكل (6-21) التالي:



الشكل رقم (6-21)

• النمط الثاني: مُغيّر خطوة من النوع (On-load Tap changer OLTC) يحتوي مقاومة (Resistive)

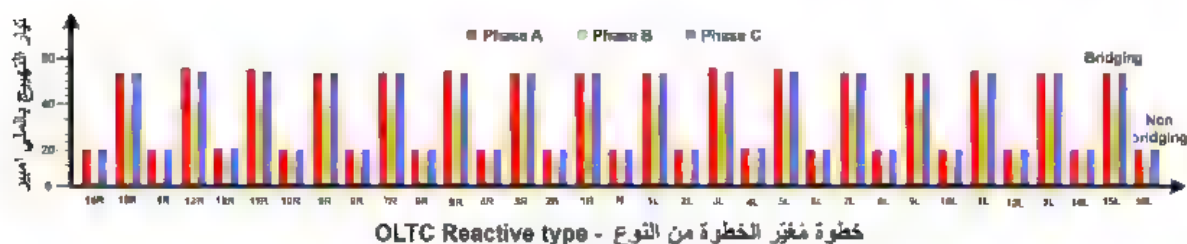
يظهر هذا النمط من القراءات عند فحص محول ذو مُغيّر خطوة من النوع (OLTC) يحتوي على مقاومة مادية (Resistive) للحد من التيارات الدوّارة (Circulating current) التي تنتج من عملية تغيير وضعية مُغيّر الخطوة (OLTC) كما يظهر بالشكل (6-22).



الشكل رقم (6-22)

• النمط الثاني: مُغَيِّر خطوة من النوع (On-load Tap changer OLTC) يحتوي محاثه (Reactive)

يظهر هذا النمط من القراءات عند فحص محول ذو مُغَيِّر خطوة من النوع (OLTC) يحتوي على محاثه (Reactive) أو ما يُسمى بالـ (Preventative Transformer - PA) للحد من التيارات الدوّارة (Circulating current) التي تنتج من عملية تعبير وضعية مُغَيِّر الخطوة (OLTC). وعند التبديل بين الخطوات يوجد وضعيتان؛ الأولى وتُسمى (Non-Bridging) والوصعية الثانية تُسمى (Bridging) وهذا يُفسر ظهور هذا النمط من القراءات المُبين في الشكل (6-23).



الشكل رقم (6-23)

8. العوامل المؤثرة على نتيجة الفحص

هنالك عدة عوامل مؤثرة على نتيجة هذا الفحص والتي لا بُد من الإحاطة بها من أجل تحديد تأثيرها أو التخفيف منه على الأقل، ومن هذه العوامل:

8.1 التمغنط الزائد للقلب الحديدي – Core Excessive Magnetizing

إن التمغنط الزائد للقلب الحديدي أو كما يُسمى بالمغناطيسية المُتبقية بالقلب الحديدي من شأنها التأثير على قيمة هذا الفحص، لذلك عند ظهور تيارات تهيج بقيم مختلفة عن بعضها البعض بين الأطوار ونسبة تباين عالية يجب التأكد من عدم وجود معنطة زائدة للقلب الحديدي قبل إجراء السبب إلى وجود عطل في المحول.

وقد تكون هذه المغناطيسية المتبقية ناتجة عن إجراء بعض الفحوصات ذات الفولتية الثابتة (DC voltage) مثل فحص مقاومة العزل (Insulation Resistance) وفحص مقاومة الملفات (Winding resistance) أحد أسباب الحصول على قراءات غير متساوية لتيار التهيج، لذلك يُنصح بإجراء هذا الفحص قبل الفحوصات سابقة الذكر وفي حال إجراء هذا الفحص بعدها يجب عمل إزالة لهذه

المغناطيسية المُتبقيّة بالطرق الواردة في نهاية الفصل الثاني والثالث من هذا الكتاب ومن ثم إعادة هذا الفحص مرة أخرى.

ملحوظة (3-6): لا يُمكن جعل قيمة مغنطة القلب الحديدي للمحول مساوية للصفر، لذلك فإن مغنطة القلب الحديدي بدرجات قليلة لا تؤثر على قيمة هذا الفحص ولكن إذا كانت المغنطة بدرجات زائدة فإنها سوف تؤثر بالتأكيد.



ملحوظة (4-6): لسوء الحظ من الصعب قياس قيمة المغناطيسية المُتبقيّة في القلب الحديدي للمحول، لذلك بعد الحصول على قيم تيارات تهيج غير متساوية وكان هنالك شك من وجود مغناطيسية متبقية، فإن الطريقة الوحيدة للتأكد من ذلك هو بعمل إزالة للمغناطيسية المُتبقيّة (De-magnetization) ومن ثم إعادة الفحص مع ضرورة التنويه إلى أن بعض المحولات تحتاج لعمل إزالة مغناطيسية متبقية (De-magnetization) أكثر من مرة للوصول إلى قيمة مغنطة متدنية للقلب الحديدي.



8.2 تصحيح قيمة الفحص للفولتية المناسبة

إن قيمة تيار التهيج المُقاسة تعتمد على قيمة فولتية الفحص ولكنها لا ترتبط بشكل خطي مع مقدار هذه الفولتية، لذلك يصعب تصحيحها حسابياً كإستخدام الإستيفاء الخطي مثلاً (Linear interpolation) وذلك لأن المُركبة المسيطرة على قيمة تيار التهيج هي مركبة حثية وكما هو معلوم أن التيار الحثي لا يرتبط خطياً بقيمة الفولتية على النقيض من التيار السعوي ذو الارتباط الخطي بفولتية الفحص، وهذا بدوره يزيد صعوبة مقارنة القيمة المُقاسة عند تطبيق فولتية فحص (2.5kV) كيلوفولت مع قيمة سابقة تم قياسها بتطبيق فولتية فحص مقدارها (10kV) كيلوفولت. لذلك ولتجنب الحوص في حيثيات التصحيح يُنصح بعمل هذا الفحص عند نفس الفولتية التي تم عمل الفحص السابق عندها وعادةً ما تكون (2.5 kV) أو (10kV) كيلو فولت كما وتتيح بعض أجهزة الفحص الحديثة التصحيح التلقائي لقيمة تيار التهيج للفولتية المرجعية (2.5KV) أو (10KV) كيلوفولت.

8.3 سيطرة مركبة التيار السعوية على تيار التهيج

يتكون تيار التهيج من ثلاث مركبات رئيسية وهي المُركبة الحثية (Inductive) والمُركبة المادية (Resistive) والمُركبة السعوية للتيار (Capacitive)، وعادة ما تُهيمن المُركبة الحثية للتيار على قيمة التيار الكلي وهذا هو الوضع الطبيعي. ولكن في حال إزدياد مُركبة التيار السعوية بحيث تهيمن على قيمة التيار الكلية فإن هذا من شأنه التأثير على نتائج الفحص وإعطاء قيم تيار غير متساوية.

مركبة التيار السعوي تُعتر عن التيار اللازم لبناء المجال المغناطيسي في المادة العازلة للمحول وعادةً ما تكون قيمتها مهملة مقارنة بمركبة التيار الحثية والمادية الناتجة عن مغنطة وضياعات القلب الحديدي، ومع تقدم العلم والصناعات وظهور المواد المُكوّنة للقلب الحديدي ذات الصياعات المحفضة كمادة (Amorphous)، وهذا بدوره أدى لتقليل من قيمة مُركبة تيار التهيج الحثية والمادية وساهم في جعل مُركبة التيار السعوية ذات قيمة لا يُمكن إهمالها مقارنة بالمُركبتين السابقتين لتيار التهيج. وبناءً على ما

سبق ونتيجة لهيمنة المُركبة السَّعوية للتيار على تيار التهيج فإن الطرق التقليدية لتحليل نتائج هذا الفحص قد لا تكون مُجدية، لذلك يتم اللجوء لتتبع نمط خسائر القدرة (Watt loss) عوضاً عن تتبع نمط تيار التهيج، حيث أن هذه الخسائر تعتمد قيمتها على قيمة مُركبة التيار المادية (Resistive). وفي حال كانت قيمة خسائر القدرة حيدة يُمكن قبول الفحص وجعل قيمته مرجعية للمرات القادمة أما في حال فشل مقارنة خسائر القدرة أيضاً، فإنه يجب البحث أكثر في أسباب عدم تساوي تيارات التهيج والتي قد تقودنا إلى وجود أعطال في المحول.

8.4 أخطاء في تطبيق خطوات الفحص

إن الأخطاء في تطبيق خطوات الفحص مثل عدم تأريض الطرف الثالث عند فحص محول ثلاثي الأعمدة (Core type) ملفاته موصولة على شكل مثلث (Δ - Delta) كما هو مبين في الشكل (18-6) سيؤدي إلى التأثير على نتائج الفحص وتغيّر نمط القراءات الظاهرة كما ذكر آنفاً.

9. فحوصات إضافية دأمة

تُعتبر المحولات من المُعدات ذات الأهمية القصوى في المنظومة الكهربائية لما لها من دور في ديمومة سريان التيار الكهربائي عن طريق ربط عناصر المنظومة الكهربائية جميعها بالإضافة إلى تكلفتها المادية المرتفعة، لذلك لا يُمكن الإعتماد على فشل فحص واحد لتقييم حالة المحول والبدء بعمل الإجراءات التصحيحية لهذا المحول، بل يجب عمل فحوصات أخرى من شأنها تأكيد ما تم الكشف عنه في هذا الفحص و تحديد نوع العطل بالصبط ثم بعد ذلك يُصار لعمل الإجراءات التصحيحية اللازم لهذا المحول و الذي قد يتطلب التواصل مع مُصنّع هذا المحول.

فعند إجراء فحص تيار التهيج وكانت نتائج الفحص غير مُرضية بعد تحليلها وفقاً للأنماط السابقة، فإنه يجب إعادة الفحص بعد التأكد من جميع خطوات الفحص ومراعاة تجنّب الأمور التي تؤثر على نتيجة هذا الفحص، وفي حال الحصول على نتيجة أخرى غير مُرضية لا يُنصح بوضع المحول بالخدمة قبل عمل تفقد داخلي بالإضافة إلى عمل الإجراءات التصحيحية اللازمة ولكن لا بُد من إجراء بعض الفحوصات الأخرى للتأكد من وجود هذه الأعطال قبل البدء بالإجراءات التصحيحية ومنها كالاتي:

- فحص نسبة عدد لفات المحول (TTR) وذلك للكشف عن مشكلة الـ (Turn to turn SC).
- فحص تحليل الإستجابة الترددية المسحي (SFRA) وذلك للكشف عن الحالة الفيزيائية للقلب الحديدي للمحول.
- فحص مقاومة ملفات المحول (WRM) وذلك للكشف عن وجود قطع (Open circuit) في موصلات الملفات الخاصة بالمحول.
- فحص مُفاعلة التسرب (Leakage reactance) للكشف عن تشوّه الملفات إن وجد.
- فحص المقاومة الديناميكي (Dynamic WRM) للكشف عن أعطال مُعيّر الخطوة (OLTC).
- فحص العارات الذائبة في الزيت (DGA) أيضاً للكشف عن وجود أعطال في مُعيّر الخطوة (OLTC)

10. أمثلة على نتائج فحوصات مصنعية

10.1 المثال الأول: الشكل (6-24) يُبين قِيمَ فحص تيار التهيج (Excitation current) مصنعي (FAT) لمحول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (Three Phase Two Winding) موصول بطريقة (Dyn1) ذو مُغَيِّر خطوة من نوع (OLTC).

Acceptance

Test Certificates

A

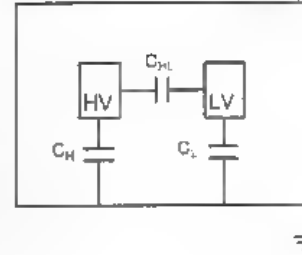
AREVA

Customer		A.C.		Page No	
		INSULATION TESTS AND EXCITING CURRENTS		Serial No	
		Standard IEC 60076-1 (§10 : 3b) & i)		Report No	
Rated Power(MVA)	24 / 30	Rated Voltage(kV)	15 / 8,5	Vector Group: Dyn1	
Object temperature	26 °C	Relative humidity	40 %	Ambient temperature 23,0 °C	
Weather	Closed Place	Rated Frequency	50 Hz	Test frequency 50 Hz	

EXCITING CURRENT MEASUREMENT

Tap Pos	Measurement	Energized	LST	Grounded	Floated	Test voltage (kV)	Reading	Reading	Multiplier	mA
1	H1H2	H1	H2	X0	H3 LV	3	49.1	49.0	10	490
	H2H3	H2	H3	X0	H1 LV	3	67.0	67.0	10	670
	H3H1	H3	H1	X0	H2 LV	3	65.4	65.4	10	654

Measuring device: M2H DOBLE Serial



الشكل رقم (6-24)

10.2 المثال الثاني: الشكل (6-25) يُبين قِيمَ فحص تيار التهيج (Excitation current) مصنعي (FAT) لمحول ثلاثي الأطوار ثلاثي الملفات (Three Phase Tertiary Winding) موصول بطريقة (YNd11-d11) ذو مُغَيِّر خطوة من نوع (OLTC).

Measurement of the no-load loss and current						
The no-load loss and current shall be measured on low voltage winding terminals at rated frequency and a voltage corresponding to excitation voltage. The remaining winding or windings shall be left open circuited.						
Measurement of the no-load current and loss, all the neutral points, core, frame, tank enclosure are earthed firmly during the test.						
Measured data:						
Excitation rate	Test voltage (kV)		No-load current		No-load loss (kW)	
	Mean value	Rms	I ₀ (A)	I ₀ (%)	P _m	P ₀
90% U ₁	10.35	10.36	4.198	0.11	43.10	43.02
100% U _r	11.50	11.55	4.141	0.11	55.74	55.49
110% U _r	11.65	13.11	17.244	0.44	89.58	86.39
Required values (in % of rated value)			P ₀ (kW)	<54		
			I ₀ (%)	<0.10		
Tested results: Measured values meet the relevant requirements.						

الشكل رقم (6-25)

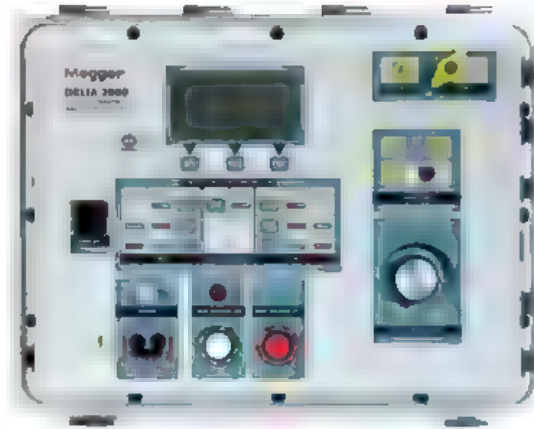
الملحق (6-1)

تنويه

يضم هذا الملحق خطوات الفحص وتوصيلاته بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسّط إستناداً على الخبرة بالتعامل مع هذه الأجهزة، وتُجدر الإشارة أنه في حال إستخدام جهاز الفحص المُشار إليه في هذا الملحق لا يجب الإعتماد على هذا الملحق فقط، بل يجب قراءة الكُتبيات التفصيلية الخاصة بهذا الجهاز والمزودة بواسطة الشركة المُصنعة للجهاز جيداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية و السلامة العامة

فحص تيار التهييج بإستخدام جهاز

DELTA2000 10kV by MEGGER



الشكل رقم (6-1-1)

• مواصفات الجهاز: حسب ال(DELTA2000 manual)

- فولتية المدخل الاسمية : 230 V, 50 Hz
- نطاق فولتية المخرج : 0 إلى 12kV

- نطاق القياسات : حسب الجدول التالي.

الجدول رقم (1-6)

القيمة المُقاسة	النطاق (Range)	درجة الوضوح (Resolution)	الدقة (Accuracy)
الفولتية	250 V – 12 kV	10 V	$\pm(1\% \text{ of reading} + 1 \text{ digit})$
التيار	0 – 5 A	1 μ A	$\pm(1\% \text{ of reading} + 1 \text{ digit})$
المواسعة	1 pF – 1.1 μ F	0.01 pF	$\pm(0.5\% \text{ of reading} + 2 \text{ pF})$ UST $\pm(0.5\% \text{ of reading} + 6 \text{ pF})$ GST
معامل التنديد	0 – 200%	0.01%	$\pm(2\% \text{ of reading} + 0.05\% \text{ DF})$
معامل القدرة	0 – 90%	0.01%	$\pm(2\% \text{ of reading} + 0.05\% \text{ PF})$
خسائر القدرة	0 – 2 kW	0.1 mW	$\pm(2\% \text{ of reading} + 1 \text{ mW})$

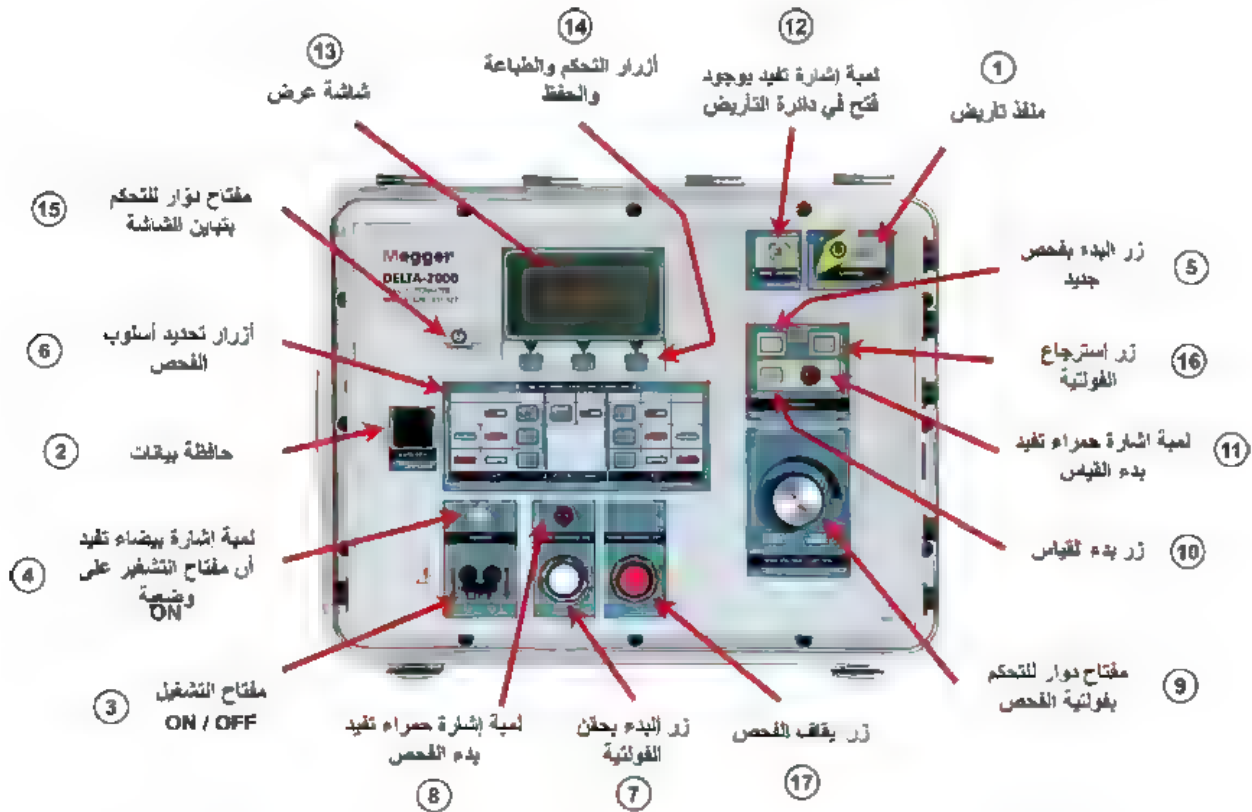
- البيئة التشغيلية المحيطة : 32° F to 122° F (0° C to 50° C) RH to 90%, Non condensing
- البيئة التخزينية المحيطة : -58° F to 140° F (-50° C to 50° C) RH to 95%, Non condensing
- أبعاد وحدة التحكم : 381 x 559 x 406 mm
- أبعاد وحدة الفولتية المرتفعة : 381 x 559 x 406 mm
- وزن وحدة التحكم : 74 lb. (33 kg)
- وزن وحدة الفولتية المرتفعة : 63 lb. (29 kg)

خطوات الفحص بواسطة هذا الجهاز:

1. التأكد من تطبيق الخطوات (5.1 إلى 5.9) الواردة في فقرة خطوات الفحص من فصل فحص تيار التهييج.
2. التأكد من أن الدائرة المُراد فحصها غير مُكهربة وعدم وجود احتمالية لكهربتها أثناء الفحص.
3. تجنب لمس دائرة الفحص أثناء إجراء الفحص أو بعده، إلا بعد التأكد من عدم وجود فولتية وأن الملفات تم تفريغها تماماً من الشحنات المخزنة.
4. التأكد من أن أسلاك التوصيل الخاصة بجهاز الفحص (Test leads) وكذلك المشابك الخاصة بها (Clamps) في حالة جيدة وغير متسحة ولا تعاني من أية أضرار فيزيائية كالشقوق أو الكسور.
5. التأكد من أن جهاز الفحص المُراد استخدامه مُعاير (Calibrated)، مع مراعاة عدم استخدام الجهاز في الأجواء القابلة للإنفجار وكذلك الأجواء الماطرة وفي حال تساقط الثلوج أيضاً.

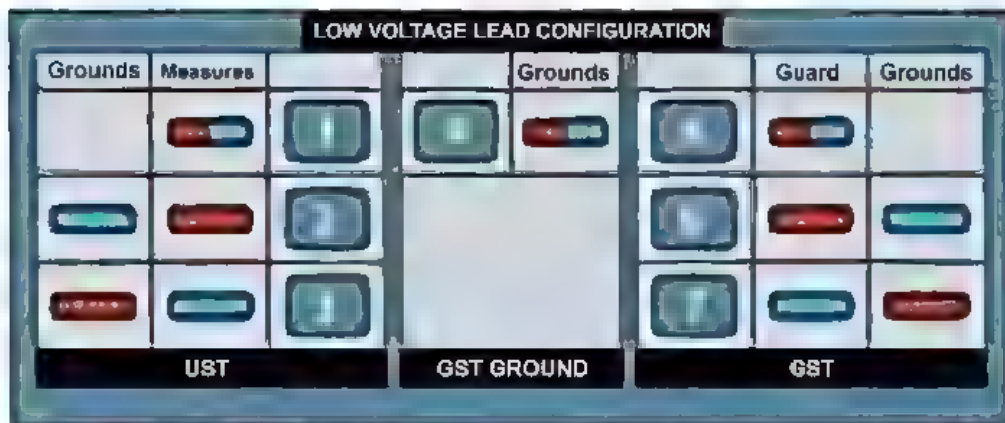
6. قبل البدء بالفحص يُفضَّل التعرف على أجزاء جهاز الفحص من شاشة وأررار ومفاتيح تحكم ولمبات إشارة كالآتي:

الشكل (6-1-2) يُبين الأجزاء الرئيسية لواجهة وحدة التحكم.



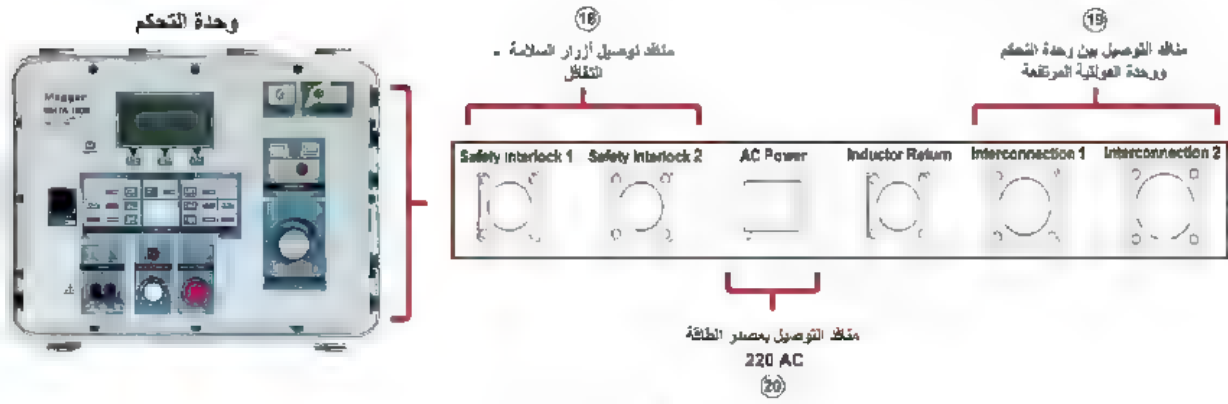
الشكل رقم (6-1-2)

الشكل (6-1-3) يُبين أزرار تحديد أسلوب الفحص الموجودة على وحدة التحكم.



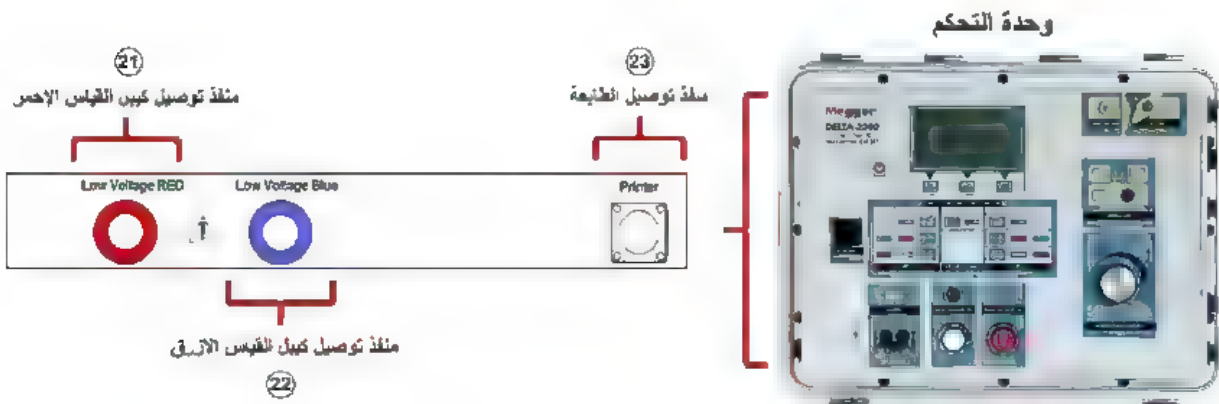
الشكل رقم (6-1-3)

الشكل (6-1-4) يُبين المنافذ الموجودة على يمين وحدة التحكم.



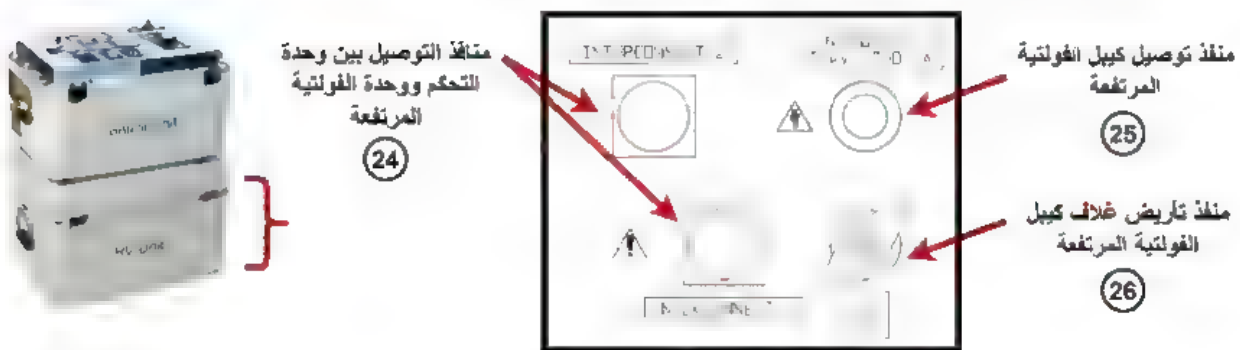
الشكل رقم (6-1-4)

الشكل (6-1-5) يُبين المنافذ الموجودة على يسار وحدة التحكم.



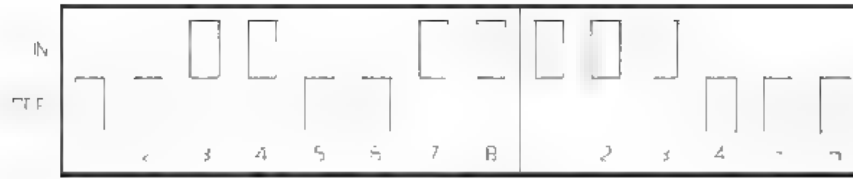
الشكل رقم (6-1-5)

الشكل (6-1-6) يُبين المنافذ الموجودة على يمين وحدة الفولتية المرتفعة.



الشكل رقم (6-1-6)

7. تهيئة منطقة الفحص عبر مراعاة الأمور التالية:
 - 7.1 التأكد من أن منطقة الفحص جافة قدر الإمكان.
 - 7.2 التأكد من عدم وجود مواد قابلة للإشتعال في منطقة الفحص.
 - 7.3 التأكد من التهوية الجيدة لمنطقة الفحص فيما إذا كانت مغلقة.
 - 7.4 مراعاة أن يكون سطح الفحص مستوي قدر الإمكان.
 - 7.5 التأكد من سلامة نظام التأريض في منطقة الفحص.
 - 7.6 وضع حواجز حول منطقة الفحص وشواخص تفيد بوجود فحص ذو فولتية خطيرة.
- 8 إحضار جهاز الفحص (DELTA2000) إلى الموقع مع مراعاة وضع الجهاز على مسافة لا تقل عن (1.8 m) عن المحول بالظل وعدم تعريضه لأشعة الشمس المباشرة لوقت طويل، حيث أن الحرارة التشغيلية للجهاز يجب ألا تزيد عن (50°) درجة مئوية، وكذلك مراعاة حفاف أجزاء الجهاز جميعها قبل تشغيله.
9. التأكد من أن مفتاح التشغيل الحاص بجهاز الفحص رقم (3) في الشكل (6-1-2) على وضعية (OFF 0 -) الموضحة على المفتاح.
- 10 وصل وحدة التحكم بالأرض (Local station earth) عبر منعذ التأريض رقم (1) في الشكل (6-1-2) بواسطة الكيبل المورّد مع الجهاز من قِبَل الشركة المُصنّعة (4.5m) متر، مع مراعاة أن يكون كيبل التأريض أول كيبل يتم وصله قبل الفحص وآخر كيبل يتم إزالته عن الجهاز بعد الفحص.
11. التأكد من أن حزام المحول موصول بالأرض (Local station earth) عبر مسار تأريض ذو معاوقة قليلة (Low Impedance)، مع مراعاة تأريض جهاز الفحص وخزان المحول من نفس نقطة التأريض.
12. توصيل كوابل الفحص وملحقات جهاز الفحص عبر المنافذ الخاصة بها كآآتي مع مراعاة التأكد من أنها مُحكّمة التركيب على جهاز الفحص وأنها مقفلة (Locked):
 - 12.1 توصيل كابلين (2 cables x 1.52m) على المنافذ رقم (19) المبينة في الشكل (6-1-4) يمين وحدة التحكم والمنافذ رقم (24) يمين وحدة الفولتية المرتفعة المبينة بالشكل (6-1-6) تبعاً للتسمية على الجهاز (Interconnection 1 & 2)، وذلك للربط بين وحدة التحكم ووحدة الفولتية المرتفعة.
 - 12.2 توصيل كيبل الفولتية المنخفضة الأحمر (كيبل القياس) على المنفذ رقم (21) على وحدة التحكم المبين في الشكل (6-1-5) على يسار وحدة التحكم.
 - 12.3 توصيل كيبل الفولتية المنخفضة الأزرق (كيبل القياس) في حال أردنا إستخدامه على المنفذ رقم (22) المبين في الشكل (6-1-5) على يسار وحدة التحكم.
 - 12.4 توصيل أسلاك أضرار السلامة أو كما يُسمى بنظام التقافل (Interlock) على المنافذ رقم (18) المبينة بالشكل (6-1-4) يمين وحدة التحكم.
 - 12.5 توصيل الطابعة بجهاز الفحص عبر المنفذ رقم (23) المبين في الشكل (6-1-5) على يسار وحدة التحكم، مع مراعاة وضعية مفاتيح التبديل الثنائي كما هو موضح بالشكل (6-1-7).



الشكل رقم (6-1-7)

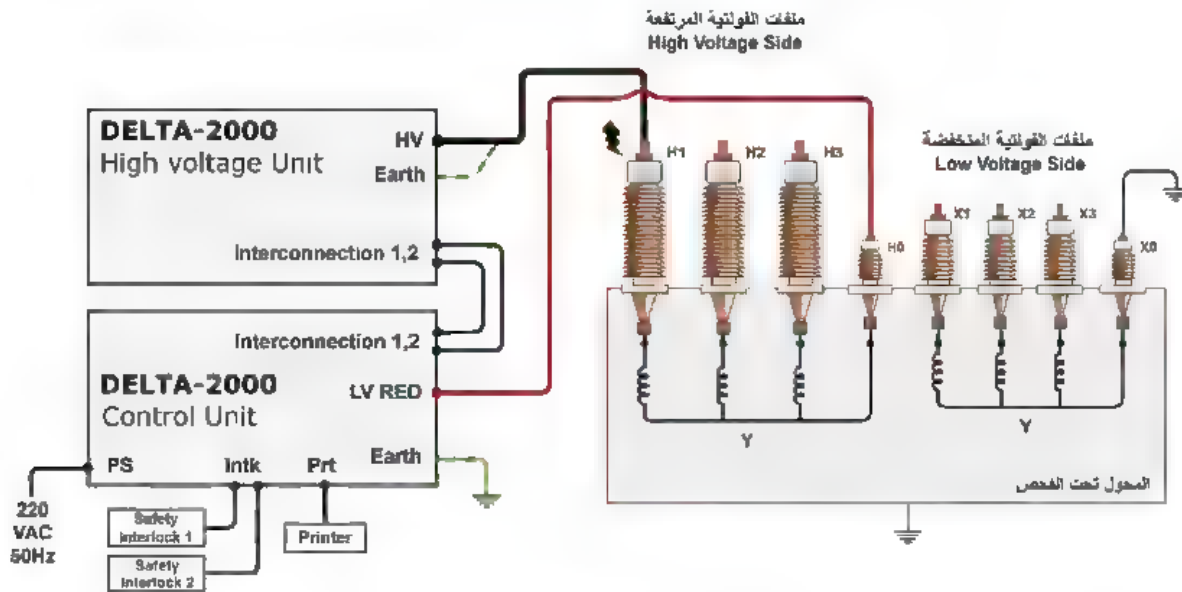
12.6 توصيل كابل الفولتية المرتفعة (الأسود) بالمنفذ رقم (25) المبين في الشكل (6-1-6) يمين وحدة الفولتية المرتفعة، مع مراعاة توصيل الغلاف الخارجي لهذا الكابل (Sheath) مع الأرض عبر المنفذ رقم (26) المبين في الشكل (6-1-6) يمين وحدة الفولتية المرتفعة.

13. التأكد من أن كابل الأرضي لمصدر الطاقة الكهربائي الخاص بجهاز الفحص موصول بالأرض (Local station earth) بمعاوقة قليلة (Low Impedance).

14. توصيل جهاز الفحص بمصدر الطاقة الكهربائية عبر المنفذ رقم (20) في الشكل (6-1-4) بحيث يتم وصل كابل الطاقة بجهاز الفحص أولاً ومن ثم بالمصدر الكهربائي.

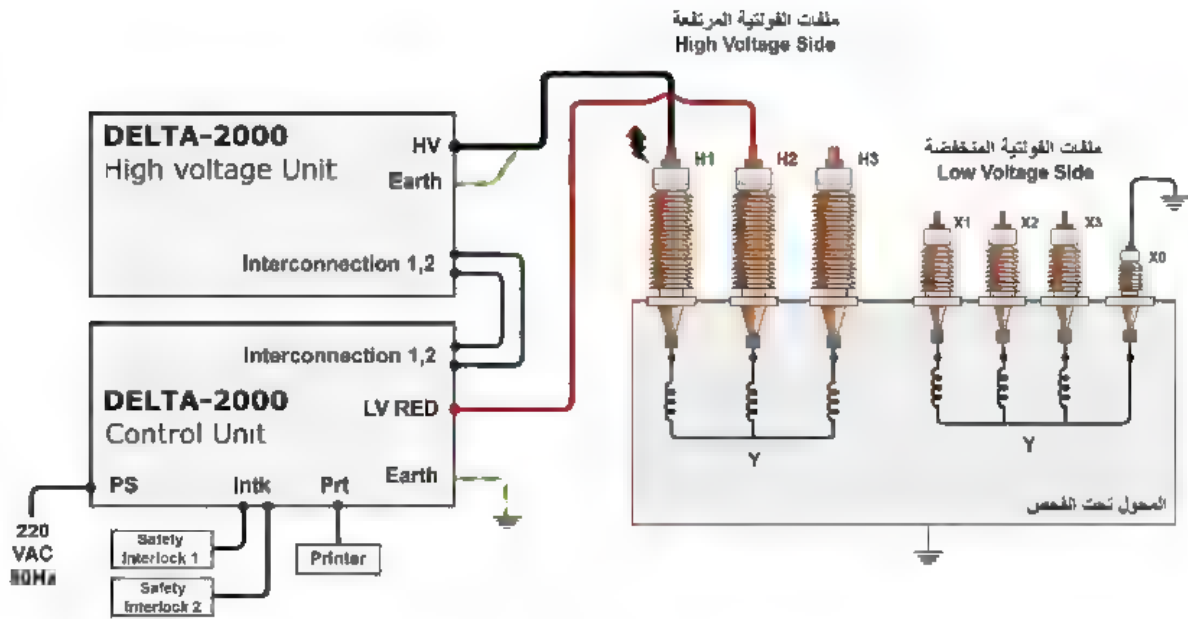
15. توصيل أسلاك الجهاز بالمحول على النحو التالي:

15.1 لفحص محول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (Three phase two winding) ذو ملفات فولتية مرتفعة موصولة على شكل نجمة (Star - Y) بنقطة تعادل يُمكن الوصول إليها (طاهرة).



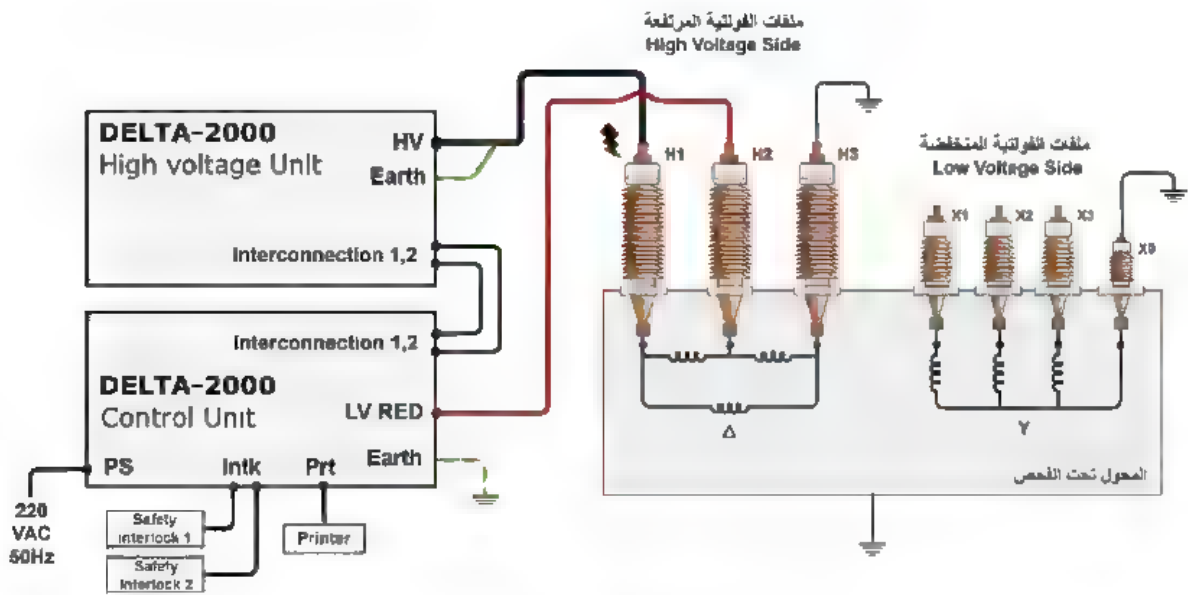
الشكل رقم (6-1-8)

15.2 فحص محول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (Three phase two winding) ذو ملفات فولتية مرتفعة موصولة على شكل نجمة (Star - Y) بنقطة تعادل لا يُمكن الوصول إليها (غير ظاهرة).



الشكل رقم (6-1-9)

15.3 لفحص محول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (Three phase two winding) ذو ملفات فولتية مرتفعة موصولة على شكل مثلث (Delta - Δ)

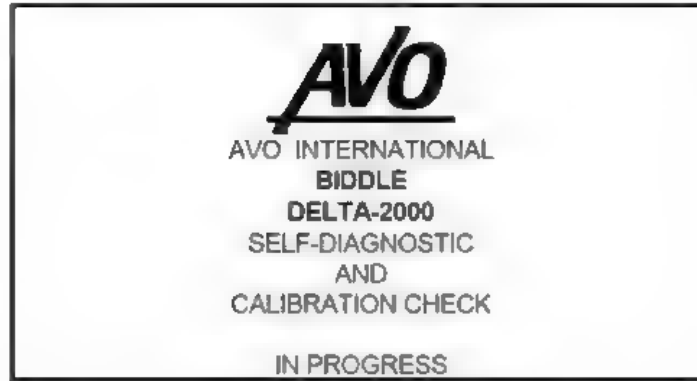


الشكل رقم (6-1-10)

15.4 فيما يخص المحولات ثلاثية الأطوار ثلاثية الملفات (Three phase tertiary winding) فإنها يتم معاملتها كالمحولات ثنائية الملفات بحيث يتم فتح أطراف ملفات الفولتية المنخفضة الأولى والثانية مع الإبقاء على تأريض نقطة التعادل (Neutral point) إن وجدت.

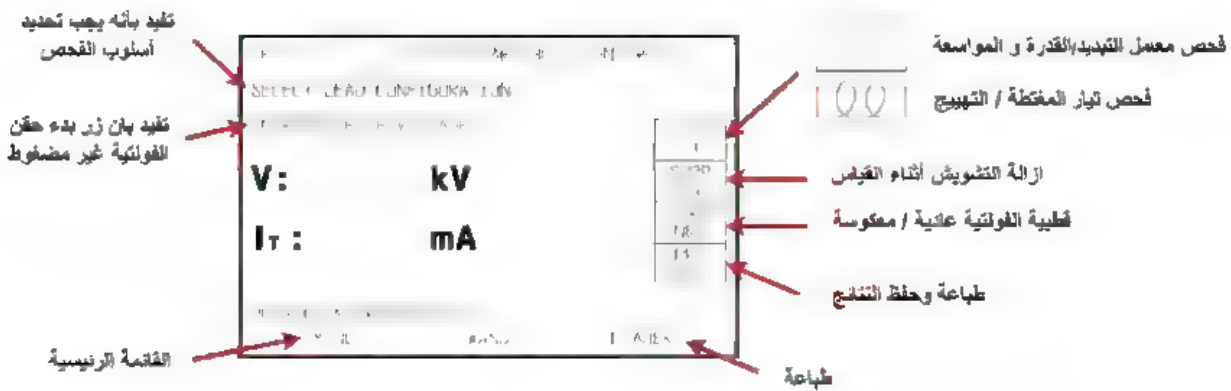
16. بعد عمل توصيلة الفحص المناسبة يقوم بتشغيل جهاز الفحص عن طريق تغيير وضعية (رفع) مفتاح التشغيل رقم (3) المبين في الشكل (6-1-2) وملاحظة إنارة لمبة الإشارة بيضاء اللون رقم (4)

المبينة في ذات الشكل. لتظهر لنا الشاشة الإفتتاحية ويبدء الإختبار التشخيصي الذاتي للجهاز كما هو مُمِين بالشكل (6-1-11).



الشكل رقم (6-1-11)

17. بعد نجاح الإختبار التشخيصي الذاتي للجهاز وعدم إيجاد أية أخطاء يقوم الجهاز بالإننتقال لشاشة الفحص الرئيسية والتي من خلالها يُمكن معرفة المعلومات المُبينة بالشكل (6-1-12).



الشكل رقم (6-1-12)

يُمكن ضبط تباين الشاشة (Contrast) بواسطة المفتاح الدوّار رقم (15) المبين في الشكل (6-1-2).

18 من شاشة الفحص السابقة يُمكن ملاحظة المربعات على يمين الشاشة والتي تشير لبعض إعدادات الجهاز بشكل مختصر فيما إذا كانت مناسبة أو لا، وفي حال أردنا ضبط إعدادات الجهاز والفحص نقوم بإختيار القائمة الرئيسية (MENU) المبينة في الشكل (6-1-12) وذلك بالضغط على الرر أسفلها، لننتقل للشاشة المُبينة في الشكل (6-1-13) والتي من خلالها يُمكن ضبط إعدادات الفحص والجهاز كالآتي بإستخدام الأزرار الثلاثة أسفل شاشة العرض:

18.1 تحديد نوع القياسات (Measurement) فيما إذا كان فحص العازل (AC Insulation test) وهو الفحص الذي تم شرحه في الفصل السابق، أو إختيار فحص تيار المغنطة / التهييج (XFMR Excitation current test) وهو ما يجب إختياره هنا.

18.2 تحديد قيمة فولتية التصحيح (Correction) بإختيار (10kV) أو (2.5kV) كيلوفولت أو إلغاء التصحيح (None).

18.3 تشغيل أو إيقاف إرالة التشويش (Interference Suppressor) وذلك بإختيار تشغيل (ON) إذا كانت منطقة الفحص عرضة للتشويش كفحص المحولات في محطات التحويل الكهربائية (Energized) مرتفعة الفولتية.

18.4 تحديد قطبية فولتية الفحص المطبقة (HV Polarity) فيما إذا كانت عادية (Normal) أو عادية ومعكوسة (Normal/Reverse) وذلك للتخلص من تأثير تيارات التشويش الكهروستاتيكية الناتجة عادة من محطات التحويل المجاورة ذات الفولتية المنخفضة.

بالإضافة إلى مجموعة من الإعدادات الأخرى الخاصة بطباعة وحفظ النتائج وضبط الوقت ومعايرة الجهاز وغيرها من الإعدادات.

EXIT TO TEST	11/26/98	10 27
MEASUREMENT:	AC INSULATION TEST (or) XFMR EXCITATION TEST	
CORRECTION:	NONE (or) 10 KV (or) 2.5 KV	
LOSS DISPLAY POWER FACTOR (or) DISSIPATION FACTOR		
INTERFERENCE SUPPRESSOR:	ON (or) OFF	
HV POLARITY	NORMAL/REVERSE (or) NORMAL ONLY	
NEXT MENU		
ENTER (OR) CHANGE	UP	DOWN

الشكل رقم (6-1-13)

19. بعد الإنتهاء من ضبط إعدادات الفحص والجهاز نقوم بإختيار (EXIT TO TEST) من الشكل (6-1-13) وذلك للرجوع لشاشة الفحص الرئيسية المبينة في الشكل (6-1-12). ومن ثم نقوم بالضغط على زر فحص جديد (New test) رقم (5) المبين في الشكل (6-1-2).

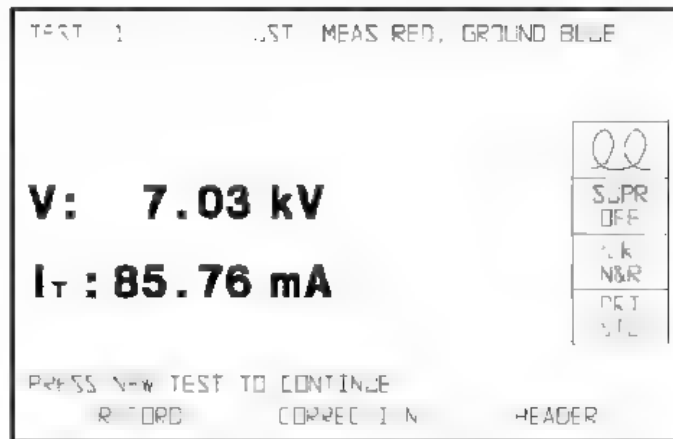
20. إختيار أسلوب فحص العينة غير المؤرصة (UST) بالضغط على الزر رقم (2) المبين في الشكل (6-1-3)

21 الضغط على أزرار السلامة أو كما يُسمى بنظام التفاعل (Safety Interlock Push Buttons 1&2) معاً و نفيهما بهذه الحالة حتى إنتهاء الفحص كما هو مبين بالشكل (6-1-14)، ويُصح بأن يكون واحد من هذه الأزرار مع مشغل الجهاز والزر الثاني مع شخص آخر لزيادة السلامة في الحالات الطارئة. حيث أنه في حالات الطوارئ أثناء الفحص نوقف الضغط على هذ الأزرار لإيقاف حقن الفولتية أو نقوم بالضغط على زر إيقاف الفحص الأحمر (17) المبين في الشكل (6-1-2).



الشكل رقم (6-1-14)

22. تصفير المفتاح الدوّار (9) المُبين في الشكل (6-1-2) أي جعله على وضعية (ZERO START).
23. الضغط على زر البدء بحقن الفولتية الأبيض (7) المبين في الشكل (6-1-2) وملاحظة إنارة لمبة الإشارة الحمراء (8) المبينة في الشكل (6-1-2) والتي تفيد بدء حقن الفولتية
24. البدء بتحريك المفتاح الدوّار (9) لرفع الفولتية وتثبيتها عند الفولتية المراد فحص المُعدّة عندها وفي حالتنا هذه سنختار (7kV) كيلوفولت. (يُمكن الإعتماد على فقرة تحديد الفولتية المضمنة في خطوات وأساليب الفحص (5) من هذا الفصل)
25. نقوم بالضغط على زر القياس (MEASURE) رقم (10) المبين في الشكل (6-1-2) وملاحظة إنارة لمبة الإشارة الحمراء (11) المبينة في الشكل (6-1-2) والتي تفيد بدء القياس حيث تنطفأ هذه اللمبة عند إنتهاء القياس ولكنها لا تعني عدم وجود فولتية.
26. بعد الإنتهاء من القياس تظهر نتيجة الفحص على الشاشة المُبينة في الشكل (6-1-15) حيث يُمكن الآن إيقاف الضغط على أزرار السلامة (Interlock pushbuttons 1&2).



الشكل رقم (6-1-15)

27. يُمكن طباعة النتيجة عبر الضغط على الزر أسفل كلمة (Header) الظاهرة على شاشة العرض لطباعة النتيجة وحفظها كما هو مبين بالشكل (6-1-16).

```
DATE: 11/22/96 10:28
TEST ID NO.: XFMR - 123 - SS 3
TEMPERATURE (°C): 27.6
TEST MODE: UST: MEAS RED, GND BLUE
MEASUREMENT: XFMR EXCITATION TEST
VOLTAGE: 7.03 kV
CURRENT: 85.76 mA
          122 mA @ 10 kV
```

الشكل رقم (6-1-16)

28. بعد ذلك يمكن الضغط على زر إيقاف الفحص الأحمر (17) المبين في الشكل (6-1-2) وكذلك تغيير وضعية المفتاح الدوّار (9) إلى الصفر في حال أردنا إنهاء الفحص، ولكن إذا أردنا إجراء فحص آخر يُمكن الضغط على زر فحص جديد (5) المبين في الشكل (6-1-2) وإعادة الخطوات من الخطوة (19) إلى آخر الخطوات.

الفصل السابع

فحص مُفاعلة التسرُّب

Leakage Reactance Test



فحص مُفاعلة التسرب

Leakage Reactance Test

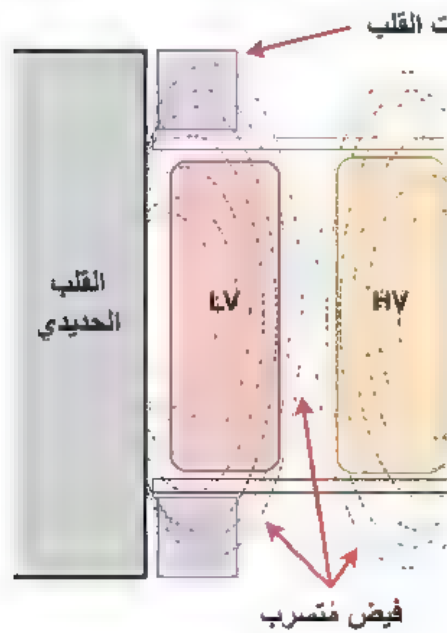
يُعتبر فحص مُفاعلة التسرب من الفحوصات الأكثر حساسية في الكشف عن حالة ملفات المحول في حال تعرضها لأي نوع من أنواع التشوّه والإحتلاف في تركيبها الفيزيائي، حيث يُعبّر هذا الفحص عن كمية الفيض المغناطيسي المُتسرب (الطاقة الضائعة) في المحول عند تطبيق فولتية مترددة على ملفاته الابتدائية لأحد الأطوار في حين ملفاته الثانوية لنفس الطور مقصورة (**Short circuited**)، أو بمعنى آخر فإنه يُعبّر عن جزء من الطاقة الضائعة أو الهبوط في الفولتية أثناء قيام المحول بعمله وهو ترويد الحمل بالطاقة الكهربائية اللازمة أو في حال كانت ملفاته الثانوية مقصورة. كما ويُمثل هذا الفحص النسخة الموقعية (**Site test**) أحادية الطور من فحص دائرة القصر المصنعي (**Short circuit test**) من حيث المبدأ مع وجود تغييرات في طريقة الفحص. ونظراً لأن فولتية الفحص أقل من قيمة الفولتية الإسمية للمحول فإن هذا الفحص يُعد من الفحوصات غير التدميرية (**Non-destructive test**).

في المحولات المثالية تكون الطاقة الداخلة (**Energy in**) مساوية للطاقة الخارجة (**Energy out**) ولكن لا يوجد ما يُسمى بالمحول المثالي واقعياً وذلك لوجود عناصر بالمحول تستهلك طاقة على شكل ضياعات في حالي الحمل (**Load**) واللاحمل (**No-load**) والتي من شأنها عمل فرق بين الطاقة الداخلة للمحول والخارجة منه ومن هذه العناصر:

- ✓ مقاومة الملفات (**Winding Resistance**) وما ينتج عنها من ضياعات تُسمى بالضياعات النحاسية (**Copper Losses**) والتي يُشار إليها عادةً بالـ (I^2R).
- ✓ مُفاعلة التسرب (**Leakage Reactance**) وما ينتج عنها من هبوط في الفولتية على طرفي المحول.
- ✓ مُماعة القلب الحديدي لمرور الفيض المغناطيسي (**Reluctance**) وما ينتج عنها من خسائر في الدائرة المغناطيسية.
- ✓ التيارات الدوّارة (**Circulating currents**) والخاصية الهستيرية (**Hysteresis**) وما ينتج عنها من ضياعات ثابتة.

ونظراً لأن هذا الفحص يتم إجراؤه أثناء قصر (**Short circuit**) أطراف الملفات الثانوية للمحول فإن هذا الفحص يُعطي قيمة ضياعات الحمل أو القصر في حالتنا هذه. وتعتمد ضياعات الحمل (**load losses**) على مقدار التيار المار في الملفات والذي بدوره يزيد مقدار الفيض المُتسرب (**Leakage Flux**) المُشار إليه في هذا الفحص بمُفاعلة التسرب (**Leakage Reactance**). حيث يُمكن تعريف الفيض المُتسرب (**Leakage flux**) على أنه الفيض الذي لا ينتقل عبر القلب الحديدي من الملفات الابتدائية إلى الملفات الثانوية وأيضاً لا يقطع الملفات الثانوية بشكل مباشر وإنما يكون بالمنطقة الفاصلة ما بين الملفات أو يقطع الملفات الابتدائية فقط أي بمعنى آخر يُمكن تحديد المسار الخاص بهذا الفيض المُتسرب بأنه المواد العازلة بين الملفات من مواد صلبة؛ كالورق والخشب أو سائلة؛ كالزيت أو الفيض في الهواء الخارجي بالإضافة للفيض الذي يقطع الملفات المنتجة له.

ومما سبق فإن أي تغيير في قيمة هذه المُفاعلة الحثية (Leakage Reactance) عن القيمة المُصمَّعة أو المرحعية سيُمثل إحتلاف في حجم المسار التسريبي لهذا الفيض سابق الذكر، والذي يعكس الإختلاف في الحالة الفيزيائية (الميكانيكية) الداخلية للمحول كتنغير



الشكل رقم (7-1)

المسافة الفاصلة بين الملفات (Winding Geometry) نتيجة لصدمة ميكانيكية خاصة أثناء نقل المحول من مكان لآخر أو تقادم المحول أو حدوث قصر أدى إلى نشوء تيارات عالية من شأنها التأثير بقوة ميكانيكية على الملفات مما أدى لتغيير الأبعاد الداخلية للملفات هذا المحول، ويُعتبر هذا الفحص بالإضافة لفحص المواسعة وفحص تيار التهيج وفحص تحليل الإستجابة الترددية المسحي (SFRA) من الفحوصات المُكتملة لبعضها، حيث أن فحص تيار التهيج يعتمد على قيمة مُمانعة القلب الحديدي (Core Reluctance) كما تم شرحه في الفصل السادس من هذا الكتاب، أما فحص مُفاعلة التسرب فهو يساعد في الكشف عن تشوّه الملفات

بالاعتماد على قيمة مُمانعة الفراغ أو المسار التسريبي (Space Reluctance) أي مسار المجال المغناطيسي خارج القلب الحديدي، أما فحص المواسعة فهو أيضاً يساعد في الكشف عن تشوّه الملفات بالاعتماد على قيمة المواسعة كما تم شرحه في الفصل الخامس من هذا الكتاب. حيث أنه تشوّه الملفات (Winding Deformation) الكبير قد يؤدي لفشل المحول مباشرة أو إذا كان هذا التشوّه صغير قد يؤدي لفشل المحول بعد مدة من الزمن قد تصل لعدة سنوات.

وكما ذكر سابقاً فإن سلامة أي محول تتلخص في سلامة ثلاثة أنظمة داخلية للمحول وهي نظام العزل و النظام الميكانيكي والنظام الحراري، حيث أن أي فشل في أي من هذه الأنظمة سيؤدي إلى فشل المحول بالكامل، وهذا الفحص يُمكن من الكشف عن سلامة النظام الميكانيكي وذلك بالكشف عن أي تشوّه أو إزاحة للملفات المحول.

ملحوظة (7-1): بالرجوع إلى معهد مهندسي الكهرباء و الإلكترونيات (IEEE) فإن هذا الفحص يُسمى فحص مُفاعلة التسرب (Leakage Reactance)، أما اللجنة الكهروتقنية الدولية (IEC) فقد اعتمدت إسماً آخر وهو فحص مُعاوقة القصر (Short circuit Impedance).



1. متى يتم إجراء هذا الفحص ولماذا؟

هناك عدة أسباب تدفعنا لإجراء هذا الفحص ومن هذه الأسباب ما هو روتيني للتأكد من سلامة المحول أو تشخيصي لتحديد الأعطال في المحول (وهو مجال بحثنا في هذا الكتاب) أو لأسباب خاصة أخرى، وتتلخص هذه الأسباب بالآتي:

- 1.1 في المصنع لضبط الجودة القصصية (Quality Control - QC) وكذلك يُعتبر من فحوصات القبول القصصية (Factory Acceptance Test - FAT) تحت مُسمى فحص مُعاوقة القصر (Short Circuit Impedance) للتأكد من سلامة المحول ومطابقته للتصميم قبل نقله للموقع
- 1.2 في الموقع قبل كهرية المحول للمرة الأولى (Transformer first energization) كأحد فحوصات القبول المُوقعية (Site Acceptance Test - SAT) للتأكد من سلامة المحول بعد نقله وتركيبه في الموقع.
- 1.3 قبل كهرية المحول (Transformer energization) بعد نقل المحول من مكان لآخر.
- 1.4 بشكل روتيني (Routine test) وذلك للكشف عن وضع المحول الحالي وإستخدام نتيجة هذا الفحص كمرجع (Reference value).
- 1.5 تحديد الأعطال داخل المحول (Fault detection - Diagnostic test)، وهو ما سيتم تناوله في هذا الفصل.

2. الدوافع التشخيصية لعمل هذا الفحص وما هي الأعطال التي يتم الكشف عنها

كما هو معلوم أن هذا الفحص يهدف للكشف عن أي تشوّه أو إزاحة لملفات المحول لذلك عادة ما يتم اللجوء لعمل هذا الفحص بهدف تشخيصي في حال تعرض المحول لظروف أو أحداث قد تؤدي لزيادة الإجهاد الميكانيكي الواقع على ملفات وقلب المحول الحديدي وما يترتب عليها من أعطال ميكانيكية أو كهربائية للمحول، وعلى سبيل المثال لا الحصر يُمكن إيجاد الأمور التالية:

- تعرّض المحول لإجهاد ميكانيكي ناتج عن عطل كهربائي مثل الأعطال الأرضية (Earth faults) أو أعطال القصر (Short circuit) أو ضربات البرق (Lightning) وما ينتج عنها من تيارات ذات قيم مُرتفعة، أو تعرّض المحول لتيارات بدء (تدفق) مُرتفعة (High inrush currents).
- تعرّض المحول لفصل قسري (Trip) نتيجة لتفعل مُرحل البوحرل (Buchholz relay) أو مرحل إرتفاع الضغط المفاجئ (Sudden pressure relay) أو غيره من الحماية الفيرائية.
- ظهور قيم مُرتفعة لنِسب الغازات القابلة للاحتراق الذائبة في زيت المحول (Dissolved combustible gas).

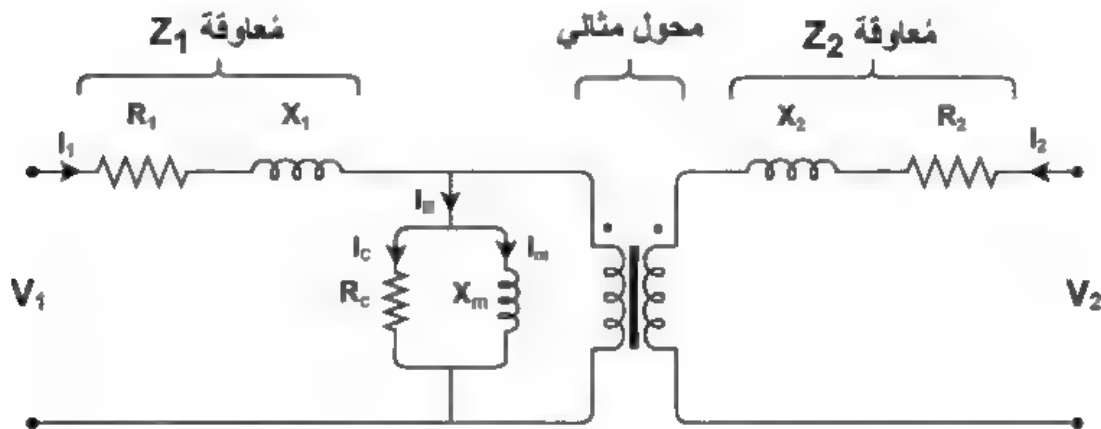
- قراءات غير جيدة لجهاز تسجيل الصدمات (Impact recorder)، حيث أن هذه الجهاز يتم تثبيته على جسم المحول أثناء نقله للتأكد من عدم تعرض المحول للصدمات فوق الحدود المسموح بها كتعرضه لصدمة ميكانيكية كبيرة كالسقوط أثناء عملية النقل.
- الهزات الناتجة عن الزلازل أو غيرها من الكوارث الطبيعية والتي قد تلحق ضرراً ميكانيكياً بالمحول.
- إرتفاع درجة حرارة ملفات المحول حيث أن الإرتفاع في قيمة الفيض المُتسرب يؤدي لإرتفاع قيمة مقاومة الملفات نتيجة للظاهرة القشرية (Skin Effect) والذي بدوره يزيد من قيمة الضياعات النحاسية أو ضياعات الحمل وما ينتج عنها من إرتفاع في درجة حرارة الملفات.
- في حال الحصول على نتائج فحوصات غير مُرضية خاصة لفحص المواسعة (Capacitance) أو فحص تيار التهيج (Excitation current) أو فحص تحليل الإستجابة الترددية المُسحي (SFRA).

ومن الأعطال التي يتم الكشف عنها من خلال هذا الفحص وجود تغيُّر في الحالة الفيزيائية (الميكانيكية) للملفات مثل حدوث تشوّه أو إزاحة (Winding Deformation or Displacement) ناتج عن الأسباب سابقة الذكر أو غيرها من الأسباب كحدوث كسر لدعائم التثبيت الداخلية أدى لحدوث هذا التشوّه.

ففي حال تعرض المحول للصدمات أو الإهتزازات أو السقوط أثناء النقل فإنه يسهّل تصوّر السبب الذي أدى لتشوّه بُنية الملفات الفيزيائية، أما فيما يخص التشوّه الناتج عن التيارات المرتفعة كتيارات البدء (Inrush currents) وتيارات العطل (Fault currents) ولفهم آلية حدوثه يُمكن إيجاد الملحق (7-2).

3. فلسفة الفحص

قبل الخوض في تفاصيل الفحص لا بُد من الإشارة إلى أن الدائرة المُكافئة للمحول كما ذكر سابقاً تتكون من مُعاوقة (Z - Impedance) لملفاتنا الابتدائية والثانوية والتي بدورها تتكون من مقاومة (R - Resistance) ومُفاعلة حثية (X_L - Reactance) على التوالي، بالإضافة لمقاومة (R_C - Resistance) ومُفاعلة حثية (X_m - reactance) موصولة على التوازي تُمثل الدائرة المغناطيسية للمحول كما هو مبين بالشكل (7-2).

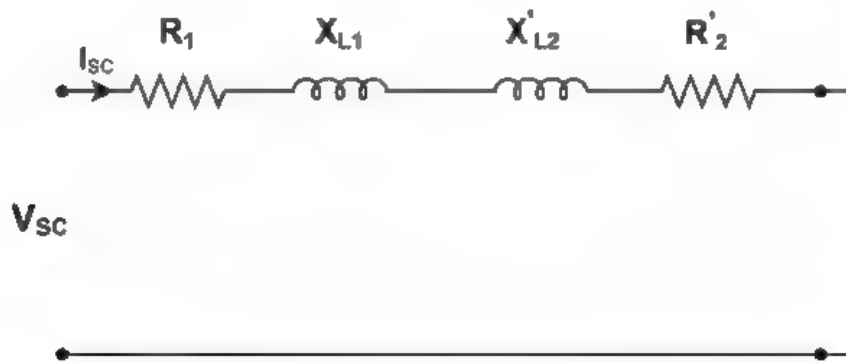


الشكل رقم (7-2)

وتكون هذه المُعاوقة (Z - Impedance) المسؤولة عن الهبوط بالفولتية على أطراف المحول وضباغات الحمل للمحول بالإضافة إلى أنها تُعطي إنطباع عن سلوك المحول في حال حدوث أعطال القصر كما وأنها ذات قيمة مؤثرة في الحد من تيارات العطل، لذلك عند تصميم المحولات تتم مراعاة أن تكون هذه المُعاوقة ليست ذات قيمة كبيرة لكي لا يزداد الهبوط بالفولتية وضباغات الحمل وكذلك يجب أن لا تكون قيمتها مُتدنية لما لها من دور في الحد من تيارات العطل. ففي طور التصنيع للمحول يتم إجراء فحص دائرة القصر القصبي (Short Circuit Test) وذلك للتأكد من قيمة مُعاوقة القصر للمحول (SC Impedance)، حيث بالرجوع إلى معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE, C57.12.00 [2015] و المعهد الوطني الأمريكي للمعايير (ANSI) فإن نسبة التباين عن القيم التصميمية لمُعاوقة المحولات ثنائية الملفات يجب أن لا تتجاوز ($\pm 7.5\%$) للمُعاوقات الأكبر من (2.5%) وما نسبته ($\pm 10\%$) من التباين للمُعاوقات الأقل أو المساوية لـ (2.5%)، أم فيما يخص معايير اللجنة الكهروتقنية الدولية (IEC, [2011-1 60076] فإن نسبة التباين عن القيم التصميمية لمُعاوقة المحولات ثنائية الملفات يجب أن لا تتجاوز ($\pm 7.5\%$) للمُعاوقات الأكبر من (10%) وما نسبته ($\pm 10\%$) من التباين للمُعاوقات الأقل من (10%).

عند سريان التيار الكهربائي في ملفات المحول سيؤدي ذلك إلى نشوء مجال مغناطيسي من شأنه الانتقال من الملفات الابتدائية للملفات الثانوية عبر القلب الحديدي (Iron core) للمحول، ولكن هالك جزء من هذا المجال يتسرب خارج القلب الحديدي (Leakage flux) والذي يتم تمثيله كمُفاعلة جِثية (X_L - Reactance) أو كما تُسمى مُفاعلة التسرب (Leakage Reactance) وهي أحد أسباب هبوط الفولتية على أطراف الملفات الثانوية للمحول، وتعتمد قيمة هذا المُفاعلة على عدد اللغات (N) وعلى قيمة تيار الحمل حيث كلما زاد التيار زاد الفيض وزاد معه الفيض المُتسرب، بالإضافة إلى أنها تعتمد أيضاً على الأبعاد الهندسية الداخلية للملفات والقلب الحديدي (Core and Winding Geometry) وهو ما يُفقد في معرفة حالة المحول الداخلية في حال اختلاف قيمة هذه المُفاعلة الجِثية.

الشكل (7-3) يُمثل الدائرة المُكافئة للمحول عند تطبيق فحص مُفاعلة التسرب (Leakage Reactance).

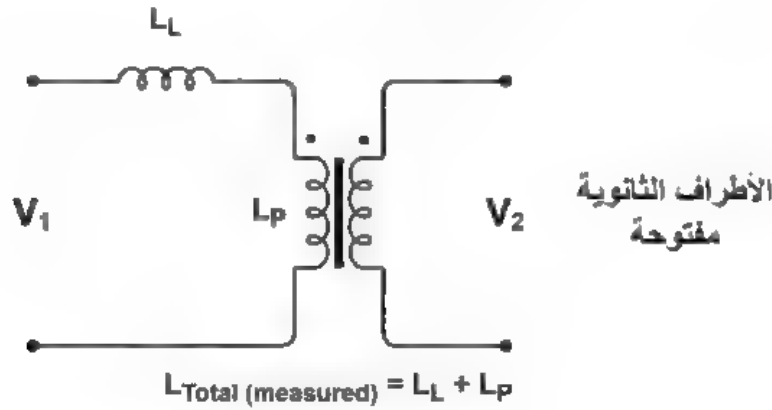


الشكل رقم (7-3)

ملحوظة (7-2): تم إهمال المُركبات (R_C و X_m) الموجودة على التوازي بالدائرة المُكافئة والتي تُمثل الدائرة المغناطيسية للمحول وذلك لقيمة تيار التهيج (I_m) المنخفضة.

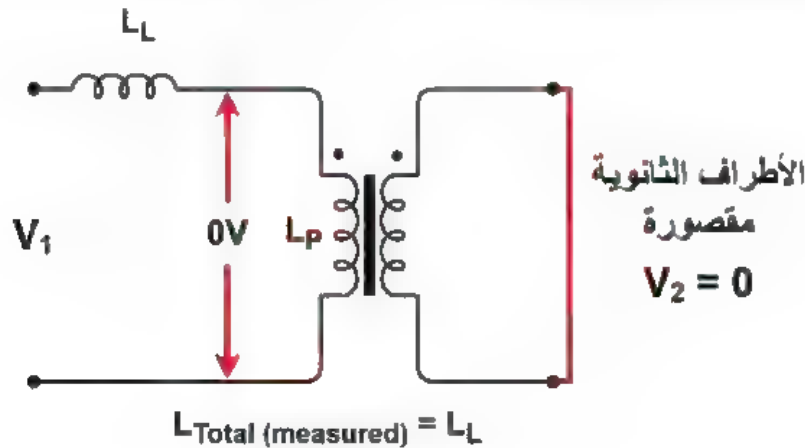


من الشكل (7-3) السابق يُمكن ملاحظة إزالة المحول المثالي من الدائرة المكافئة للفحص علماً بأن المحول المثالي يكون ذو محاثية ابتدائية (L_p) تُمثل الملفات نفسها وكذلك الحال للملفات الثانوية (L_s)، ويعود السبب في إزالته إلى دائرة القصر (SC) المُطبقة على ملفات المحول الثانوية حيث قبل تطبيق دائرة القصر (SC) فإن قيمة المحاثية للملفات الابتدائية الكلية ستساوي ($L_L + L_p$) أي محاثية التسرب مضافاً إليها محاثية الملفات نفسها كما هو مُبين بالشكل (7-4).



الشكل رقم (7-4)

ولكن عند تطبيق دائرة قصر على الملفات الثانوية فإن فولتية الملفات الثانوية نظرياً ستساوي الصفر ($E_2 = 0$)، مما يعني أن فولتية الملفات الابتدائية أيضاً ستساوي الصفر أيضاً ($E_1 = 0$) كما هو مبين بالشكل (7-5)، مما يجعل محاثية الملفات الابتدائية مساوية للصفر ($L_p = 0$) ويجعل محاثية التسرب وحيدة مما يُسهّل قياسها وهذا بدوره يُفسّر وظيفة دائرة القصر عند إجراء هذا الفحص



الشكل رقم (7-5)

وبعد عمل دائرة قصر (Short circuit) على الملفات الثانوية يتم تطبيق فولتية على الملفات الابتدائية وقياس الفولتية والتيار والخسائر في القدرة (Watt loss)، ومن ثم وبالإعتماد على القيم المُقاسة يتم احتساب قيمة مُفاعلة التسرب (Leakage Reactance)

معلومة إضافية: عبر تطبيق فحص دائرة القصر القصير القصير (Short circuit test) يُمكن إستخراج قيمة مُعاوقة المحول (Impedance - Z) بالنسبة المئوية (%) وتُمثل هذه المُعاوقة مقدار الهبوط بالفولتية

على أطراف الملفات الثانوية عند تطبيق الفولتية الإسمية على الملفات الابتدائية عند الحمل الكامل للمحول (أو في حالة قصر الملفات الثانوية) كما هو مُبين بالمعادلة (7.1).

$$V_{drop} = Z\% = \frac{I_{Full} \cdot Z}{E} \times 100\% \quad (7.1)$$

حيث:

- V_{drop} : نسبة الهبوط بالفولتية.
- $Z\%$: نسبة مُعاوقة القصر (Short circuit impedance %).
- I_{Full} : تيار الحمل الكامل (Full load current).
- E : فولتية الأطراف المفتوحة (Open circuit voltage).
- Z : قيمة المُعاوقة والتي تتكون من المقاومة (R) والمُفاعلة الجِثية (X_L).

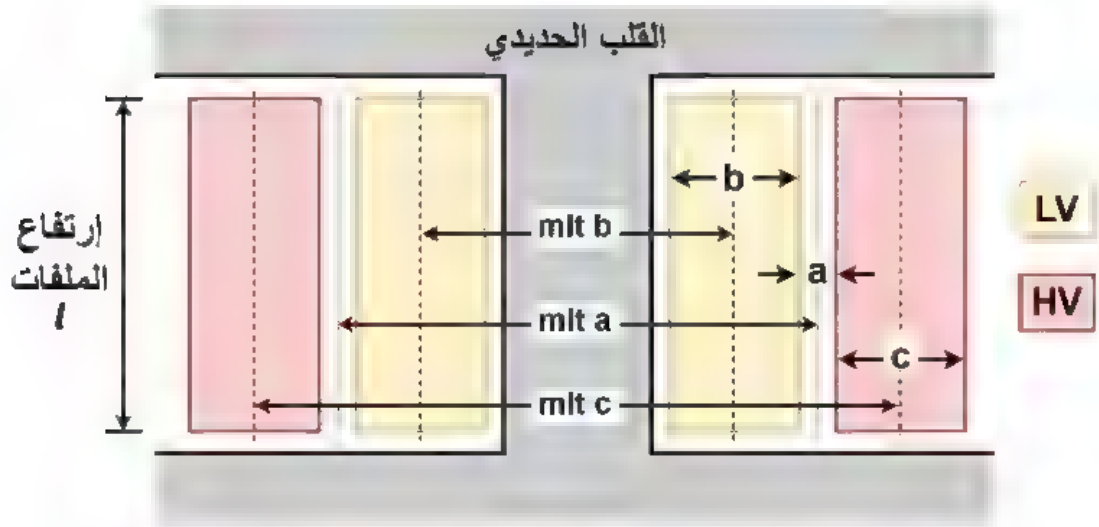
ونظراً لأن المقاومة المادية (R - Resistance) تُشكل جزء صغير من المُعاوقة (Z - Impedance) وذلك بسبب قيمة معامل القدرة (PF - Power Factor) المرتفعة في حالة قصر الملفات الثانوية (شبه حمل حثي خالص) فإنه يُمكن اعتبار أن ($X_L \approx Z$)، وعادة ما تكون قيمة المُعاوقة ($Z\%$) محصورة من 4% إلى 20% لمحولات القدرة.

ملحوظة: يُفضل أن تكون قيمة المُعاوقة (Z - Impedance) مرتفعة من وجهة نظر مُشغلي الشبكة الكهربائية ($Grid$) وذلك لما لها من دور في الحد من تيارات القصر، أما فيما يخص المنشأة المالكة للمحول فإنه يُفضل أن تكون قيمة هذه المُعاوقة قليلة وذلك للتقليل من قيمة الهبوط في الفولتية على أطراف المحول الثانوية وتقليل ضياعات الحمل ($Load loss$) داخل المحول.



- ويبقى التساؤل المطروح "كيف يَدُل فحص مُفاعلة التسرب ($Leakage Reactance$) على وجود تشوّه في ملفات المحول؟"

كما هو معلوم فإن قيمة مُفاعلة التسرب ($Leakage Reactance$) للمحول تعتمد على عدد اللفات (N) ومقدار التيار في الملفات وما ينتج عنه من الفيض المُتسرب ($Leakage flux$) بالإضافة إلى هندسية القلب الحديدي للمحول ($Core geometry$) كما هو مُبين في الشكل (6-7)، فالتالي أي تغيّر في الأبعاد الهندسية للمحول من الداخل (خاصة أبعاد القلب الحديدي وما ينتج عنه من اختلاف في المسافة الفاصلة بين الملفات) سوف يؤدي إلى اختلاف المسار التسريبي للفيض الابتدائي مما يعكس تغيّر في قيمة مُفاعلة التسرب ($Leakage Reactance$) والذي بدوره يُعطي إشارة عن وجود اختلاف في هذه الأبعاد الداخلية للمحول.



الشكل رقم (7-6)

والمعادلة (7.2) التالية توضح تأثير أبعاد المحول الداخلية على قيمة مُفاعلة التسرب (Leakage Reactance):

$$X\% = \frac{KF(3aml_t_a + bml_t_b + cml_t_c)}{\phi_m l} \quad (7.2)$$

حيث:

- K : ثابت يعتمد على نظام الوحدات المُستخدم.
- F : مقدار التيار لكل لفّة.
- ϕ_m : القيمة العُظمى للفيض المغناطيسي في القلب الحديدي للمحول.
- وفيما يُخصّ باقي الرموز يُمكن إيجادها من الشكل (7-6) السابق.

ومنه فإن قيمة مُفاعلة التسرب (Leakage Reactance) تدلّ على حدوث إراحة أو تشوّه للملفات قد يكون ناتج عن حدوث صدمة ميكانيكية أو حدوث عطل ذو تيارات عالية أدى إلى تغيّر هندسية الملفات واختلاف المسار التسريبي للفيض المغناطيسي داخل المحول.

4. أساليب الفحص

بالرجوع إلى معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE) يُمكن إجراء هذا الفحص باستخدام الأساليب التالية:

4.1 الأسلوب الأول: الفحص أحادي الطور - Per phase test

في هذه الطريقة يتم الفحص لكل طور على حدة وذلك بتطبيق فولتية مترددة (AC) على طور واحد فقط من الملفات الابتدائية ذات الفولتية المرتفعة للمحول (HV side) مع مراعاة قصر (SC) أطراف نفس الطور من الملفات الثانوية ذات الفولتية المنخفضة للمحول (LV side)، حيث أن الملفات لنفس الطور

يُقصد بها الملفات الابتدائية والثانوية الموحدة على نفس العامود للقلب الحديدي (Limb) والتي يُمكن تحديدها بطرق متعددة سيتم التطرق لها. كما وتجدر الإشارة إلى أن الفحص بهذا الأسلوب لا يُمكن تطبيقه على جميع المحولات خاصة تلك التي لا تحتوي على نقطة تعادل (Neutral Point) ظاهرة.

ملحوظة (3-7): في هذا الأسلوب وبما ان نتيجة الفحص لا يتم مقارنتها بالقيمة المُثبتة على لوحة بيانات المحول (Nameplate) فإن وضعية مُغيّر الخطوة غير مهمة ولا يجب أن يكون على نفس الخطوة (Tap) التي تم إجراء فحص القِصر المصنعي عندها، حيث انه في هذا الأسلوب يتم الإكتفاء بمقارنة نتائج الفحص بين الأطوار الثلاثة وملاحظة إختلافها.



• المعدات المستخدمة بالفحص:

- **مصدر كهربائي:** مصدر فولتية أحادي الطور متردد مُتحكم به (Single phase regulated AC power supply)، عادةً ما يتم استخدام (VARIAC 0-300V, 10A) مع مراعاة أن يكون المصدر مُعاير (Calibrated).
- **جهاز قياس تيار متردد (AC) رقمي (True RMS Digital Ammeter):** ذو دقة عالية (high Accuracy) على الأقل (0.5%) وكذلك ذو تدرج (Scale) مناسب لقيَم الفحص مع مراعاة أن يكون جهاز الفحص مُعاير (Calibrated).
- **جهاز قياس فولتية مترددة (AC) رقمي (True RMS Digital Voltmeter):** ذو دقة عالية (high Accuracy) على الأقل (0.5%) وكذلك ذو تدرج (Scale) مناسب لقيَم الفحص مع مراعاة أن يكون جهاز الفحص مُعاير (Calibrated).
- **جهاز قياس قدرة فعالة (Active power) مُعاير (Calibrated).**
- **أسلاك توصيل:** يجب أن تكون أسلاك التوصيل أقصر ما يُمكن بالإضافة إلى أن تكون مناسبة للتيار الذي سيمر بها، وذلك تجنباً لإضافة مقاومة غير مرغوب بها لدائرة الفحص في حال كانت الأسلاك غير مناسبة مثل أن تكون الأسلاك ذات مساحة مقطع عرضي صغير أو من مادة ذات موصلية رديئة مما يُضيف مقاومة غير مرغوب بها لدائرة الفحص ستؤثر على نتيجة الفحص، حيث أن أقل مساحة مقطع (Cross-section) موصى به عند إجراء هذا الفحص هي (1AWG) أي ما يُعادل (424 mm^2) كما ورد في معيار معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE C57.152-2013].

• توصيلة الفحص:

تعتمد توصيلة الفحص على مجموعة التوصيل للمحول (Vector group) حيث يجب تطبيق الفولتية على أطراف الملف الابتدائي لأحد أطوار الفولتية المرتفعة وقِصر (SC) أطراف الملف الثانوي لنفس الطور على جهة الفولتية المنخفضة.

فكما ورد سابقاً أن الفحص بهذا الأسلوب لا يُمكن تطبيقه على جميع مجموعات التوصيل الخاصة بالمحولات خاصة تلك التي لا تحتوي على نقطة تعادل (Neutral Point) ظاهرة، حيث أن مجموعات التوصيل التي يُمكن تطبيق هذه الأسلوب عليها يُمكن حصرها بالجدول الآتي:

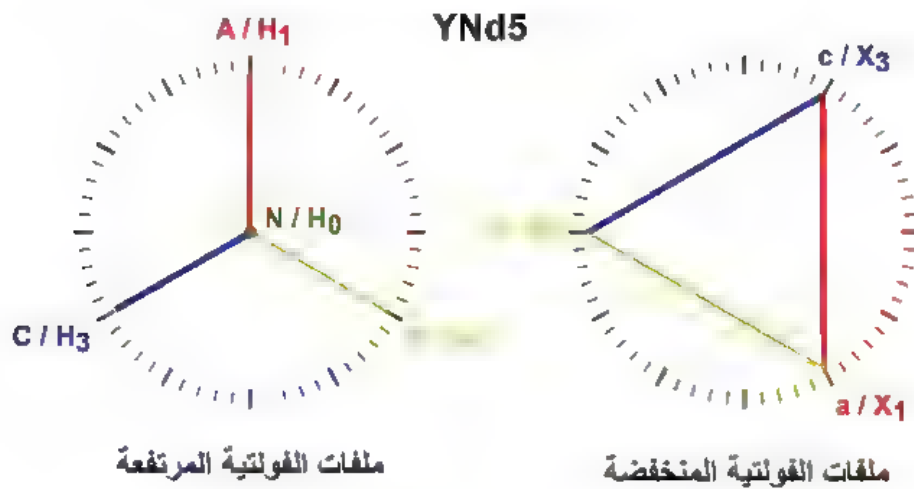
الجدول رقم (7-1)

مجموعة التوصيل – Vector Group	
YNyn	YNd
Dd	Dyn

ويبقى التساؤل المطروح "كيف يُمكن تحديد أطراف الطور المُراد تطبيق الفولتية عليه وأطراف الطور التي يجب قَصَرها (Short circuited)؟"

لتحديد أطراف المحول يُمكن الإعتماد على الجداول الواردة في المُلحق (4-3) من فصل فحص دسة لفات المحول (TTR) رقم (4). أو بواسطة الطريقة الآتية:

مثال: فلنعرض أننا أردنا فحص محول ذو مجموعة توصيل (YNd5) نقوم برسم المخطط الشعاعي/المُتجهي (Vector phasor diagram) لهذه المجموعة كالآتي.



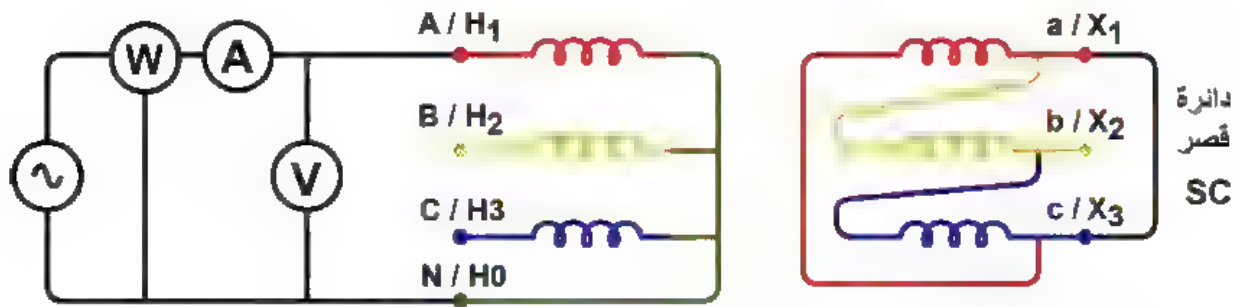
الشكل رقم (7-7)

ومن الشكل (7-7) يُمكن ملاحظة أن الأطراف الواجب تطبيق الفولتية عليها عند فحص الطور (A) هي (H1 - H0) و الأطراف الثانوية الواجب قَصَرها هي (X3 - X1)، وفيما يخص باقي الأطوار فإنها حسب الجدول (7-2).

الجدول رقم (7-2)

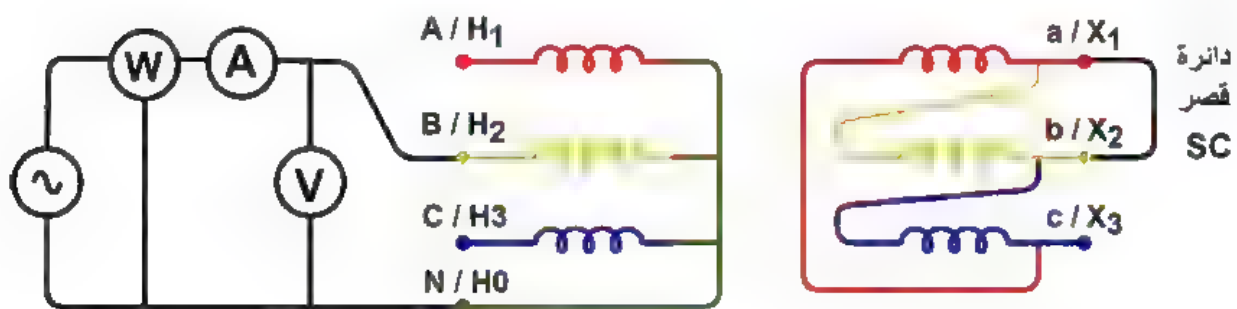
مجموعة التوصيل (YNd5)	
الأطراف التي يجب تطبيق الفولتية عليها	الأطراف الواجب قَصَرها (SC)
H1 - H0	X3 - X1
H2 - H0	X1 - X2
H3 - H0	X2 - X3

لتكون التوصيلة كما هو موضح بالشكل (7-8) والذي يُبين التوصيلة اللازمة لفحص الطور (A) مع مراعاة تطبيق دائرة القصر (Short circuit) على ملفات الفولتية المنخفضة ذات الصلة فقط.



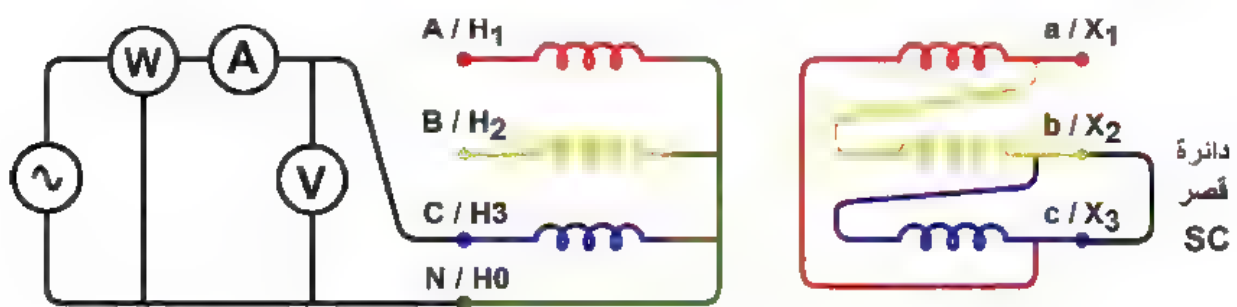
الشكل رقم (7-8)

ولفحص الطور (B) نقوم بإجراء التوصيلة الموضحة في الشكل (7-9) والذي يُبين التوصيلة اللازمة لفحص هذا الطور مع مراعاة تطبيق دائرة القصر (Short circuit) على ملفات الفولتية المنخفضة ذات الصلة فقط.



الشكل رقم (7-9)

ولفحص الطور (C) نقوم بإجراء التوصيلة الموضحة في الشكل (7-10) والذي يُبين التوصيلة اللازمة لفحص هذا الطور مع مراعاة تطبيق دائرة القصر (Short circuit) على ملفات الفولتية المنخفضة ذات الصلة فقط.



الشكل رقم (7-10)



ملحوظة (7-4) : يجب أن يتم توصيل الأسلاك المُستخدمة في قَصْر الملفات بشكل مستقيم قدر الإمكان حتى لا تضيق مقاومة ومحاثة غير مرغوب بها إلى دائرة الفحص.

كما ويُمكن إيجاد الملحق (7-3) الذي يَضم توصيلة هذا الفحص لبعض مجموعات التوصيل الأكثر شيوعاً.

• الحسابات اللازمة:

بعد القيام بالتوصيلة كما تم شرحه مُسبقاً وإجراء الفحص بهذا الأسلوب يُمكن إستخراج قيمة التيار و الفولتية وخسائر القدرة وإحتساب قيمة المُعاوقة (**Impedance - Z**) عبر تطبيق المعادلة (7.3) التالية:

$$Z_m = \frac{V_m}{I_m} \quad (7.3)$$

ومن ثم يتم إحتساب قيمة زاوية الطور (φ) بالإعتماد على قيمة خسائر القدرة بواسطة المعادلات التالية وذلك ليتنسى لنا حساب قيمة مُفاعلة التسرب (**Leakage Reactance**).

$$P_m = V \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (7.4)$$

$$\varphi = \cos^{-1}\left(\frac{P_m}{V_m \cdot I_m}\right) \quad (7.5)$$

ومن ثم يتم حساب قيم مُفاعلة التسرب (**Leakage Reactance**) وفقاً للمعادلة (7.6) التالية:

$$X_L = Z_m \cdot \sin(\varphi) \quad (7.6)$$

وبعد ذلك يتم إحتساب (**X%**) كنسبة مئوية لينتم مقارنتها بالفحوصات السابقة وفقاً للمعادلة (7.7) التالية:

$$X\% = \frac{1}{10} X_L \frac{S_{1\phi}}{V_{winding}^2} \quad (7.7)$$

حيث:

$S_{1\phi}$: القدرة الظاهرية بالكيلوفولت أمبير (**Apparent power - kVA**) الإسمية للملف المُراد فحصه (**per phase**) وذلك بقسمة القدرة الكلية للمحول على 3 للمحولات ثلاثية الطور.
 $V_{winding}$: الفولتية الإسمية للملفات المُراد فحصها بالكيلوفولت (**kV**)، بحيث يتم إستخدام فولتية الخط (**Line to Line**) للملفات الموصولة على شكل مثلث (**Delta - Δ**)، و فولتية الطور (**Phase to Neutral**) للملفات الموصولة على شكل نجمة (**Star - Y**).

مثال توضيحي:

إذا علمت أنه تم إجراء فحص مُفاعلة التسرب بالأسلوب آحادي الطور (Per Phase Leakage Reactance) لمحول ذو المواصفات التالية (3phase, Δ/Y, Base voltage 400kV, Base VA 200MVA) وكانت قراءات الفولتية والتيار والقدرة وفقاً للجدول التالي.

الجدول رقم (7-3)

الطور	الفولتية (V)	التيار (I)	القدرة (W)
A	245	1.1	8
B	250	1.2	8.5
C	255	1.2	8.5

قم بإيجاد قيمة مُفاعلة التسرب (Leakage reactance) بالأوم وأيضاً بالنسبة المئوية (X%)

الحل:

إيجاد قيمة المُعاوقة (Z) بالأوم للطور (A)

$$Z_m = \frac{V_m}{I_m} = \frac{245}{1.1} = 222.73 \Omega$$

حساب قيمة الزاوية (ϕ)

$$\phi = \cos^{-1}\left(\frac{P_m}{V_m \cdot I_m}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{8}{245 \times 1.1}\right) = 88.3^\circ$$

حساب قيمة مُفاعلة التسرب (X_L) بالأوم

$$X_L = Z_m \cdot \sin(\phi) = 222.73 \times \sin(88.3^\circ) = 222.6 \Omega$$

حساب قيمة مُفاعلة التسرب بالنسبة المئوية ($X_L\%$)

$$X\% = \frac{1}{10} X_L \frac{S_{rated}}{V_{rated}^2} = \frac{222.6}{10} \times \frac{66,666}{400^2} = 9.3\%$$

وبنفس الطريقة يتم الحساب لباقي الأطوار.

ومن أوجه قصور هذا الأسلوب (Per phase test) أنه لا يُمكن تطبيقه على جميع مجموعات التوصيل (Vector groups) للمحولات، حيث يلزم في هذا الفحص أن تكون نقطة التعادل (Neutral point) ظاهرة للملفات الموصولة على شكل نجمة (Star - Y) كما تم شرحه مسبقاً.

4.2 الأسلوب الثاني: الفحص ثلاثي الطور المُكافئ - Three phase equivalent test

في هذه الطريقة نقوم بتطبيق الفولتية المترددة (AC) على أطراف الخط (line to line) لأحد أطوار الملفات الابتدائية ذات الفولتية المرتفعة مع مراعاة قصر (SC) أطراف الملفات الثانوية ذات الفولتية المنخفضة جميعها ما عدا نقطة التعادل (Neutral Point) إن وجدت، وفي هذا الأسلوب يتم مقارنة

كتاب الفحوصات التشخيصية للمحولات الكهربائية (النسخة الإلكترونية)

قيمة المعاوقة المُقاسة ($Z\%$ - Impedance) بقيمة مُعاوقة القِصر (SC Impedance) الناتجة من الفحص القصبي والمُثبتة على لوحة بيانات المحول (**Name plate**)، حيث أن الاختلاف الرئيسي بين الفحص بهذا الأسلوب والفحص القصبي أنه في هذا الأسلوب يتم استخدام مصدر فولتية آحادي الطور. كما وتُجدر الإشارة إلى أنه يُمكن تطبيق هذا الفحص بهذا الأسلوب على المحولات التي لا يُمكن الوصول إلى نقطة التعادل (**Neutral point**) الخاصة بها مثل (**Yy or Dy**)، أما فيما يخص المحولات التي يُمكن الوصول إلى نقطة التعادل (**Neutral point**) الخاصة بها فإنه يتم إجراء هذا الفحص بأسلوب الفحص آحادي الطور (**Per phase test**) كما تم شرحه سابقاً. ومن أوجه قصور هذه الأسلوب مقارنةً بالأسلوب آحادي الطور (**Per phase test**)، أن قيمة مُعاوقة القِصر المُقاسة ($Z\%$ - Impedance) تكون للثلاثة أطوار محتمة مما قد يُخفي وجود مشاكل على واحد أو أكثر من الأطوار.

ملحوظة (5-7): يجب التأكد من وضعية مُغيّر الخطوة (**Tap changer**) عند إجراء الفحص بهذا الأسلوب بحيث يجب أن يكون على نفس الخطوة (**Tap**) التي تم إجراء فحص القِصر القصبي عندها ليتسنى لنا مقارنة النتائج بشكل صحيح.

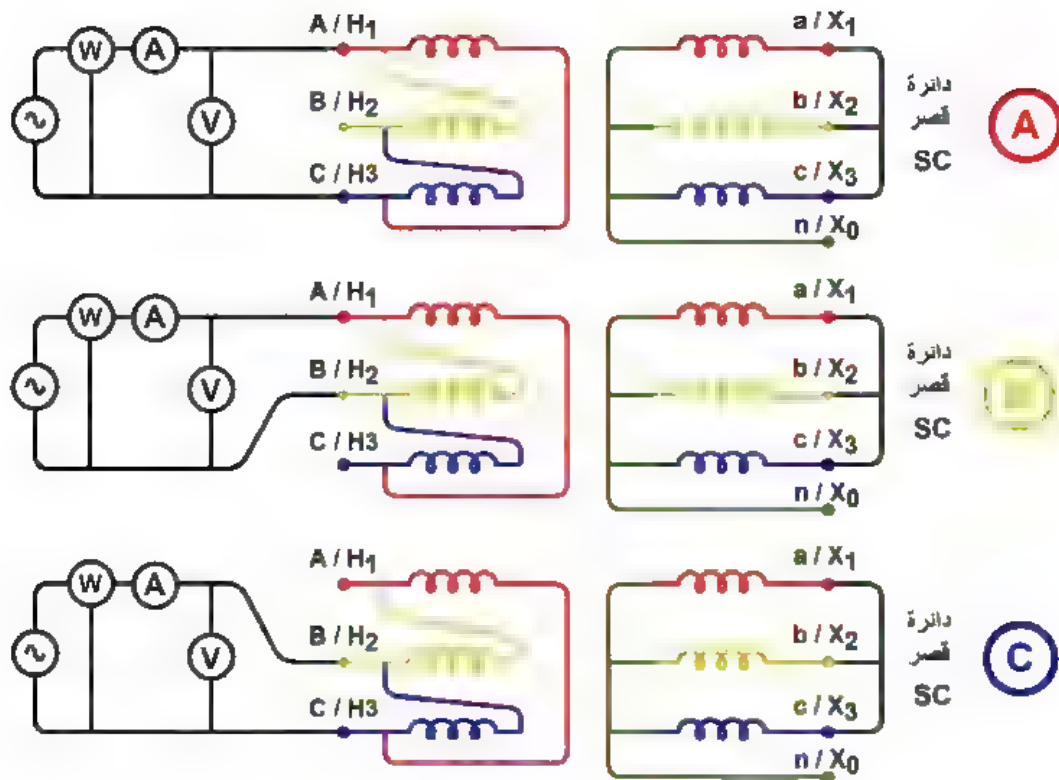


• المعدات المستخدمة بالفحص:

نفس المعدات في الفحص بالأسلوب آحادي الطور (**Per phase test**) سابق الذكر.

• توصيلة الفحص:

تعتمد توصيلة الفحص على مجموعة التوصيل للمحول (**Vector group**)، حيث يجب تطبيق الفولتية على أطراف الخط (**line to line**) لأحد أطوار الملفات الابتدائية ذات الفولتية المرتفعة وقصر أطراف الملف الثانوي جميعها ما عدا نقطة التعادل (**Neutral point**) إن وُجدت كما هو مُبين بالشكل (7-11) والذي يوضح توصيلة الفحص لمحول ذو مجموعة توصيل (**Dyn1**).



الشكل رقم (7-11)

الجدول رقم (7-4)

الأطراف المفتوحة	الأطراف المقصورة	أطراف الحقن	الطور تحت الفحص
H2	X1 - X2 - X3	H1 - H3	A
H3	X1 - X2 - X3	H2 - H1	B
H1	X1 - X2 - X3	H3 - H2	C

• الحسابات اللازمة:

بعد القيام بالتوصيلة كما تم شرحه مُسبقاً وإجراء الفحص بهذا الأسلوب يُمكن إستخراج قيمة التيار و الفولتية وخسائر القدرة وإحتساب قيمة المُعاوقة (**Impedance - Z**) عبر تطبيق المعادلة (7.8) التالية:

$$Z\% = \frac{1}{60} \left(\frac{E_1 + E_2 + E_3}{I} \right) \left(\frac{S_{3\phi}}{V_{L-L}^2} \right) \quad (7.8)$$

أو

$$Z\% = \frac{1}{60} \sum Z_m \cdot \left(\frac{S_{3\phi}}{V_{L-L}^2} \right) \quad (7.9)$$

حيث:

- $S_{3\phi}$: القدرة الظاهرية الاسمية للملفات المفحوصة بالكيلوفولت أمبير (kVA).
 V_{L-L} : فولتية الخط (Line) الاسمية للملفات المفحوصة بالكيلوفولت (kV).
 $E_{1,2,3}$: مجموع فولتيات الفحص المُقاسة للأطوار الثلاثة.
 I : قيمة التيار المُقاسة.
 ΣZ_m : مجموع المُعاوقات للأطوار الثلاثة.

ملحوظة (7-6): كما ذكر سابقاً أن المعاوقة ($\text{Impedance} - Z$) تتكون من مركبتين رئيسيتين الأولى مادية (R) و الثانية حثية (X_L)، وعادةً ما تكون قيمة المقاومة قليلة خاصة للمحولات ذات السعة الكبيرة (**High power transformer**) لذلك يُمكن إستخدام مصطلح المعاوقة ($\text{Impedance} - Z$) للإشارة للمُفاعلة الحثية (X_L) أو كما تُسمى مُفاعلة التسرب (**Leakage Reactance**).



مثال توضيحي:

إذا علمت أنه تم إجراء فحص مُفاعلة التسرب بالأسلوب ثلاثي الطور المُكافئ (**Three Phase Equivalent test**) لمحول ذو المواصفات التالية (**3phase, Δ/Y , Base voltage 138kV, Base VA 30MVA**) وكانت قراءات الفحص وفقاً للجدول التالي.

الجدول رقم (7-5)

الطور	الفولتية (V)	التيار (I)	القدرة (W)	المعاوقة (Ω)
A	260	1.91	11	136.10
B	260	1.87	9.5	139.67
C	260	1.90	11	137.01

قم بإيجاد قيمة مُفاعلة التسرب (**Leakage reactance**) بالنسبة المئوية ($X\%$) أو ($Z\%$) عوضاً عنها

$$Z\% = \frac{1}{60} \sum Z_m \cdot \left(\frac{S_{3\phi}}{V_{L-L}^2} \right)$$

$$Z\% = \frac{1}{60} (136.10 + 139.67 + 137.01) \frac{30,000}{138^2}$$

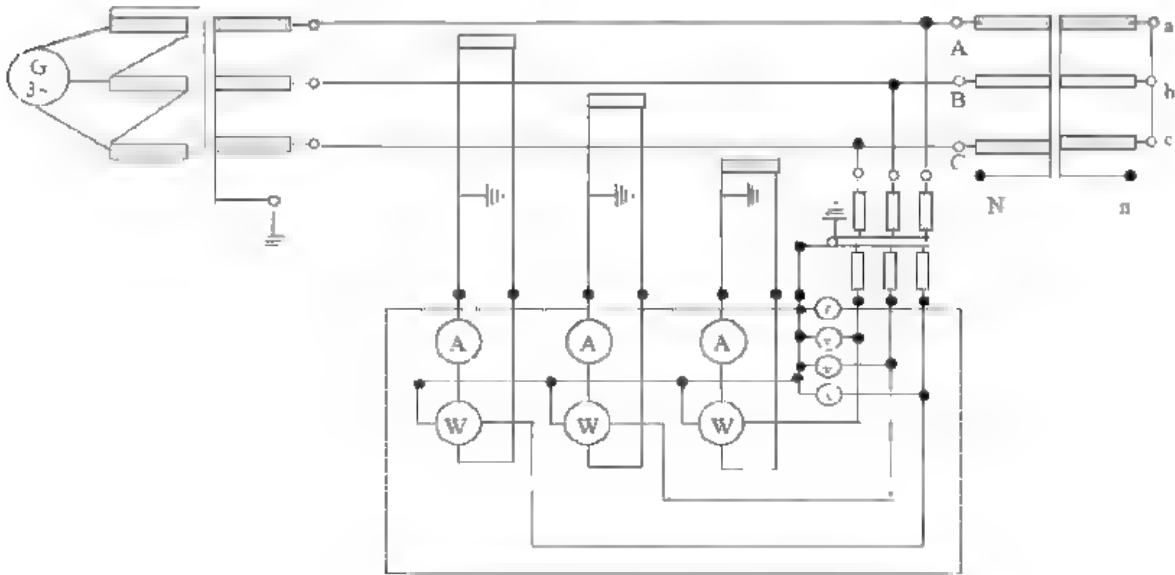
$$= 10.8 \%$$

4.3 الأسلوب الثالث: فحص القصر القصبي - Factory Short Circuit test

عادةً ما يتم اللجوء لعمل هذا الفحص في حال تعذر إجراء الفحص بالأسلوب الأول أحادي الطور (per phase test) نتيجة لمجموعة التوصيل للمحول المراد فحصه كعدم وجود نقطة تعادل (Neutral point) يمكن الوصول إليها (طاهرة)، و أيضاً في حال تعذر إجراء هذا الفحص بالأسلوب ثلاثي الطور المكافئ (Three phase equivalent test) نتيجة لعدم توفر مصدر أحادي الطور مثلاً.

كما وتجدر الإشارة إلى أن إجراء الفحص بهذا الأسلوب لا يُعد من الفحوصات التشخيصية وإنما وجب الحديث عن هذا الأسلوب للتمييز بينه وبين فحص مُفاعلة التسرب الموقعي (Leakage Reactance test)، حيث أن هذا الفحص يتم إجراءه بتطبيق الفولتية على الملفات الابتدائية (الثلاثة أطوار مُجمعة دون نقطة التعادل) تصاعدياً حتى الوصول إلى التيار الإسمي في الملفات الابتدائية عندها يتم قسمة الفولتية التي وصل عندها جهاز الحقن على الفولتية الإسمية للمحول مع مراعاة قصر أطراف الملفات الثانوية (الثلاثة أطوار مُجمعة دون نقطة التعادل).

وأيضاً يمكن إجراء هذا الفحص بالموقع باستخدام نفس التوصيلة ولكن دون الوصول إلى قيمة التيار الإسمي ويسمى هذا الفحص بـ (Short circuit test - reduced current).



الشكل رقم (7-12)

الجدول (7-6) يُبين بعض أوجه الاختلاف بين فحص مُعاوقة القِصر المصنعي (Short circuit test) وفحص مُفاعلة التسريب الموقفي (Leakage reactance test).
الجدول رقم (7-6)

وجه الاختلاف	فحص مُعاوقة القِصر المصنعي Short circuit test	فحص مُفاعلة التسريب Leakage reactance test
تطبيق الفولتية	على الأطوار الثلاثة معاً	على طور واحد فقط
تيار الفحص	التيار الإسمي للمحول	تيار قليل (2 - 10 A)
فولتية الفحص	فولتية عالية قد تصل إلى 20% من الفولتية الإسمية للمحول	فولتية قليلة (50 - 300 V)
القيمة المُقاسة	المُعاوقة %Z خسائر حمل I^2R مرتفعة نتيجة لمرور التيار الإسمي	المُفاعلة %X خسائر حمل I^2R منخفضة بسبب تيار الفحص القليل

5. خطوات الفحص

بعد التعرّف على فلسفة الفحص وتوصيلاته وطريقة احتساب قيمة مُفاعلة التسريب، يُمكن البدء بخطوات الفحص كالآتي:

5.1 عزل المحول كهربائياً (Transformer De-energization) مع مراعاة تطبيق نظام (إقفال مصادر الطاقة ووضع لافتات عليها) أو ما يُسمى بنظام التقافل (Lock-out Tag-out LOTO).

5.2 عزل نظام مكافحة الحريق بالماء (أو كما يُسمى نظام تبريد خزان المحول ومنع إنتشار الحريق) الخاص بالمحول المُراد فحصه خشية عمل النظام بشكل خاطئ أثناء إجراء الفحص مما قد يؤدي لمخاطر القوس الكهربائي وما ينطوي عليه من مخاطر على الأشخاص أو المحول خاصة أثناء تطبيق الفولتية على المحول أو قد يؤدي الماء لتلف جهاز الفحص نفسه.

5.3 تطبيق كافة إجراءات السلامة الخاصة بإجراء الفحوصات الكهربائية المُضمّنة في معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE Recommended Practices for Safety in High-Voltage and High-Power Testing) و المعهد الوطني الأمريكي للمعايير (ANSI National Electrical Safety Code) و مُنظمة إدارة السلامة والصحة المهنية (OSHA Specifications for Accident Prevention Signs and Tags).

5.4 فتح أطراف الفولتية المنخفضة (LV side terminals) والفولتية المرتفعة (HV side terminals) وذلك بإزالة الموصلات عنها (Removing HV&LV Cables or Busbars) وكذلك الحال بنقطة التعادل للمحول (Neutral point) إن وجدت.

5.5 تمرير الشحنات المُخزنة بملفات المحول (Trapped Charges) قبل توصيل كوابل الفحص وذلك بعمل دائرة قِصر للملفات (Short circuit) وتأريضها لمدة من الزمن وكذلك الحال بعد الإنتهاء من الفحص وقبل إزالة كوابل الفحص. بالإضافة إلى التأكد من تأريض حران المحول أثناء إجراء الفحص.



تحذير: يكون تأريض كوابل الفولتية المرتفعة إما عبر مُستعزلات التأريض الثابتة (Earthing Dis-connector) أو المتنقلة (Portable) قبل البدء بفك هذه الكوابل عن عوازل إختراق المحولات (Bushings)، وذلك لما قد تحويه من فولتية حثية (Induction voltage) ناتجة عن المُعدات أو الخطوط الهوائية (Overhead Lines - OHL) المجاورة للمحول المُراد فحصه والمشحونة بقولتبات مرتفعة.

5.6 التأكد من أن حزان المحول والقلب الحديدي موصول بالأرض بشكل مباشر (Solidly grounded)

5.7 تسجيل درجة الحرارة ونسبة الرطوبة.

5.8 التأكد من وضعية مُغيّر الخطوة (Tap changer) بحيث تكون عند الخطوة التشغيلية المرجعية للمحول أي يكون عندها مُغيّر الخطوة أثناء العمل الطبيعي للمحول وهذا في حال كان الفحص بالأسلوب أحادي الطور (Per phase test)، أما في حال كان الفحص بالأسلوب ثلاثي الطور المُكافئ (Three phase equivalent test) فإنه يجب إختيار الخطوة (Tap) لتكون نفسها للفحص السابق أو المُصنعي ليتسنى لنا مقارنة النتائج بشكل صحيح.

5.9 عمل التوصيلة الخاصة بهذا الفحص وفقاً لأسلوب الفحص المُراد إجراؤه وكما هو موضح في فقرة أساليب الفحص سابقة الذكر بالإضافة للرجوع إلى الملحق (3-7) لمجموعات التوصيل الأكثر شيوعاً أو الملحق (3-4) من فصل فحص نسبة لفات المحول (TTR) رقم (4) من هذا الكتاب.

5.10 تطبيق فولتية مترددة (AC) على الملفات الإنداثية للحصول على تيار محصور بين (10A - 1) أمبير ومقدار هبوط بالفولتية من (100V - 30) فولت، وعادةً ما يتم إعتداد تيار فحص مقداره (1A) أمبير مع التأكد من أن مقدار الهبوط بالفولتية محصور بين (100V - 30) وإن لم يكن كذلك يُمكن زيادة مقدار تيار الفحص للحصول على قيمة الفولتية المناسبة، بعد ذلك نقوم بقياس الفولتية والتيار المتولد بالإضافة إلى خسائر القدرة ومنه يتم إحتساب مُفاعلة التسرب كما تم شرحه مسبقاً في فقرة أساليب الفحص.

5.11 كما ويُمكن إجراء هذا الفحص بواسطة أجهزة الفحص الحديثة كما هو مبين في الملحق رقم (1-7) الخاص بجهاز الفحص (TESTRANO 600) المُصنّع بواسطة شركة (OMICRON).

6. تصحيح القيمة المُقاسة

عند إجراء هذا الفحص بالأسلوب أحادي الطور (Per phase test) فإنه لا حاجة لتصحيح القيمة المُقاسة تبعاً لدرجة الحرارة، وذلك لأن الفحص على الأطوار الثلاثة يكون تقريباً عند نفس درجة الحرارة مما يُتيح مقارنة نتيجة الفحص دون الحاجة للتصحيح، أما في حال إجراء هذا الفحص بالأسلوب ثلاثي الطور المُكافئ (Three phase equivalent test) ولغايات مقارنته بالنتيجة المُثبتة على لوحة بيانات المحول (Nameplate) فإنه لا بُد من تصحيح القيمة المُقاسة تبعاً لدرجة الحرارة وذلك بواسطة المعادلة الخاصة بذلك والواردة في فقرة تصحيح القيمة المُقاسة من فصل فحص مقاومة الملفات (WRM) رقم (3) من هذه الكتاب.

7. تحليل نتائج الفحص

يوجد عدة طرق لتحليل نتيجة فحص مُفاعلة التسرب (Leakage Reactance) حسب أسلوب الفحص المُتبّع ووفقاً لما ورد في معيار معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE, C57.152-2013] بالإضافة لما ورد في الكتاب [Jill C. Duplessis, Electric Field Tests for the Life Management of Transformers]:

7.1 الفحص بالأسلوب أحادي الطور (Per phase test):

عند إجراء الفحص بهذا الأسلوب فإنه يجب مقارنة قيمة مُفاعلة التسرب المُقاسة لكل طور بالأوم (Ω) مع قيمة مُفاعلة التسرب المتوسطة (Average) للأطوار الثلاثة بالأوم (Ω) على أن لا تزيد نسبة التباين عن (3%) بالمئة، وعادة ما تكون قيمة التباين لأغلب المحولات السليمة أقل من (1%) بالمئة.

7.2 الفحص بالأسلوب ثلاثي الطور المكافئ (Three phase equivalent test):

في حال كان المحول جديد فإنه يتم مقارنة قيمة مُعاوقة القَصْر المُقاسة بالقيمة المُثبتة على لوحة بيانات المحول (Nameplate) على أن لا تتجاوز قيمة التباين عن (3%) بالمئة، وفي حال مقارنة نتيجة الفحص بنتائج فحوصات سابقة فإن نسبة التباين يجب أن تكون أقل من (2%) بالمئة.

8. العوامل المؤثرة على نتيجة الفحص

هنالك عدة عوامل مؤثرة على نتيجة هذا الفحص والتي لا بُد من الإحاطة بها من أجل تحييد تأثيرها أو التخفيف منه على الأقل عند إجراء هذا الفحص، ومن هذه العوامل:

8.1 مساحة المقطع العرضي للأسلاك المُستخدمة في قَصْر الملفات (Winding Short circuit wires cross-section)

كما تم شرحه سابقاً فإن قيمة المُعاوقة (Z) تتكون من مقاومة (R) ومُفاعلة حثية (X_L) أو كما تُسمى بمُفاعلة التسرب، وفي حال استخدام أسلاك ذات مساحة مقطع صغيرة هذا بدوره سيُضيف مقاومة غير مرغوب بها إلى دائرة الفحص مما يؤثر على قيمة المُعاوقة المُقاسة. لذلك يُنصح باستخدام أسلاك ذات مساحة مقطع عرضي (Cross-section) مساوٍ أو أكبر من (1WAG) أي ما يُعادل (424 mm^2) حسب معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE, C57.152-2013] كما ذكر سابقاً.

وكذلك الحال إذا كانت الأسلاك المُستخدمة في قَصْر (SC) الملفات الثانوية للمحول طويلة ومرتبطة بشكل حلقي فإنها ستضيف محاثّة غير مرغوب بها إلى دائرة الفحص من شأنها التأثير على نتيجة الفحص أيضاً لذلك يُنصح باستخدام أسلاك ذات مساحة مقطع عرضي مناسبة بالإضافة إلى أن تكون أقصر ما يكون، وفي حال استخدام أسلاك طويلة نوعاً ما يجب ترتيبها بشكل طولي لا حلقي للأسباب السابقة الذكر.

8.2 وضعية مُغيّر الخطوة (Tap changer position)

عند تحليل النتائج ومقارنة نتيجة الفحص بالأسلوب ثلاثي الطور المُكافئ (Three phase equivalent test) بالقيمة المُثبتة على لوحة بيانات المحول (Nameplate) فإنه يجب ملاحظة وضعية مُغيّر الخطوة (Tap changer) أثناء إجراء الفحص بحيث تكون نفس الوضعية (Same tap position) التي تم إجراء الفحص عليها في المصنع والمُثبتة على لوحة بيانات المحول (Name plate) لما لها من تأثير على نتيجة الفحص.

9. فحوصات إضافية دائمة

تُعتبر المحولات من المُعدات ذات الأهمية القصوى في المنظومة الكهربائية لما لها من دور في ديمومة سريان التيار الكهربائي عن طريق ربط عناصر المنظومة الكهربائية جميعها بالإضافة إلى تكلفتها المادية المرتفعة، لذلك لا يُمكن الإعتماد على فشل فحص واحد لتقييم حالة المحول والبدء بعمل الإجراءات التصحيحية لهذا المحول، بل يجب عمل فحوصات أخرى من شأنها تأكيد ما تم الكشف عنه في هذا الفحص وتحديد نوع العُطل بالصبط ثم بعد ذلك يُصار لعمل الإجراءات التصحيحية اللازم لهذا المحول والذي قد يتطلب التواصل مع مُصنّع هذا المحول.

فعند إجراء فحص مُفاعلة التسرب وكانت نتائج الفحص غير مُرضية بعد تحليلها وفقاً لما تم شرحه سابقاً، فإنه يجب إعادة الفحص بعد التأكد من جميع خطوات الفحص ومراعاة تجنّب الأمور التي تؤثر على نتيجة هذا الفحص، وفي حال الحصول على نتيجة أخرى غير مُرضية لا يُنصح بوضع المحول بالخدمة قبل عمل تفقد داخلي بالإضافة إلى عمل الإجراءات التصحيحية اللازمة ولكن لا تُد من إجراء بعض الفحوصات الأخرى للتأكد من وجود هذه الأعطال قبل البدء بالإجراءات التصحيحية ومنها كالآتي:

- فحص الفولتية المنخفضة النبضي/الدفني - Low Voltage Impulse (LVI) وذلك للكشف عن الحالة الفيزيائية للقلب الحديدي وكذلك ملفات المحول.
- فحص تحليل الإستجابة الترددية المسحي (SFRA) وذلك للكشف عن الحالة الفيزيائية للقلب الحديدي وكذلك ملفات المحول، ولكن هذا الفحص لا يُعنى بتشوّه الملفات فقط وإنما ينظر على نطاق واسع من الحصائص الميكانيكية للمحول لذلك فهو غير حساس لتشوّه الملفات بقدر فحص مُفاعلة التسرب.
- فحص المواسعة (Overall Capacitance) وذلك للكشف أيضاً عن الحالة الفيزيائية للقلب الحديدي وملفات المحول، ولكن هنالك عدة عوامل من شأنها التأثير على قيمة المواسعة مثل درجة الحرارة، بالإضافة إلى أن حساسية فحص المواسعة ليست كبيرة أي أن تشوّه أو إزاحة كبيرة في الملفات قد لا تظهر في فحص المواسعة أو قد تعطي تغيّر طفيف على قيمة المواسعة المُقاسة.

الخلاصة: يُمكن القول أن فحص مُفاعلة التسرب (Leakage Reactance) من أكثر الفحوصات حساسية لتشوّه أو إزاحة ملفات المحول.

الملحق (7-1)

تنويه

يضم هذا الملحق خطوات الفحص وتوصيلاته بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسّط. إستناداً على الخبرة بالتعامل مع هذه الأجهزة، وتُجدر الإشارة أنه في حال استخدام جهاز الفحص المُشار إليه في هذا الملحق لا يجب الإعتماد على هذا الملحق فقط، بل يجب قراءة الكُتبيات التفصيلية الخاصة بهذا الجهاز والمزودة بواسطة الشركة المُصنعة للجهاز جيداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية و السلامة العامة

فحص مُفاعلة التسرّب باستخدام جهاز TESTRANO 600 by OMICRON



الشكل رقم (7-1-1)

• مواصفات الجهاز: حسب الـ (TESTRANO600 Brochure)

- فولتية المدخل الاسمية : 100/240 V, 50/60 Hz
- فولتية المدخل المسموح بها : 85-264 V, 45-65 Hz
- نطاق تيار/فولتية المخرج : حسب الجدول التالي.

عدد الأطوار	نطاق الفولتية (AC)	التيار الأقصى (AC)
ثلاثي الأطوار	0 ... 230 V	100 mA
	0 ... 80 V	16 A
	0 ... 40 V	33 A
آحادي الطور	0 ... 240 V	16 A
	0 ... 120 V	33 A

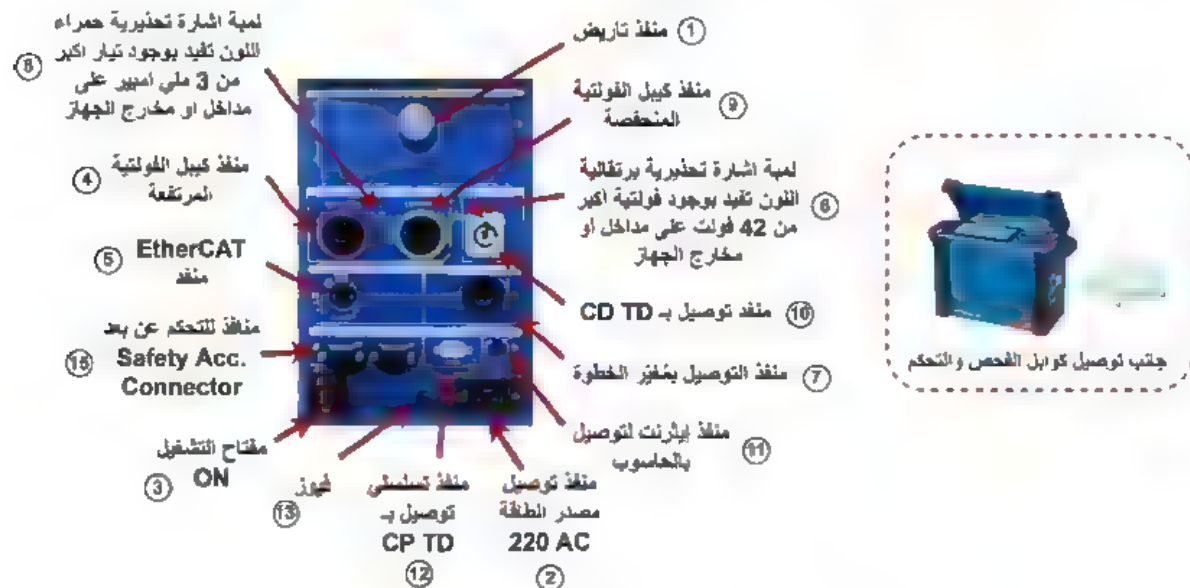
- دقة النطاق المُقاس : حسب الجدول التالي.

النطاق	دقة القراءات
1:1 ... 10	0.03% rd + 0.043% range
1:10 ... 100	0.027% rd + 0.043% range
1:100 ... 1000	0.027% rd + 0.043% range
1:1000 ... 10000	0.027% rd + 0.043% range

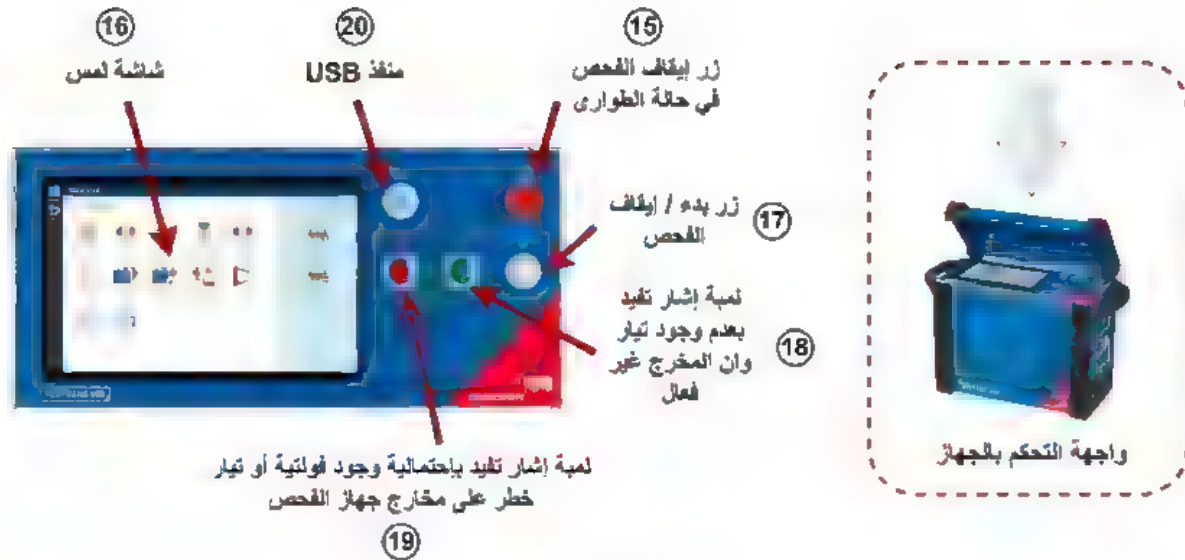
- البيئة التشغيلية المحيطة : 14° F to 131° F (-10° C to 55° C) RH to 95%, Non condensing
- البيئة التخزينية المحيطة : -22 to 158° F (-30 to +70°C)
- أبعاد الجهاز : 580 x 386 x 229 mm
- وزن الجهاز : 45.5 lb. (20.6 kg), with display

• خطوات الفحص بواسطة هذا الجهاز:

1. التأكد من تطبيق الخطوات (5.1 إلى 5.8) الواردة في فقرة خطوات الفحص من فصل فحص مُفاعلة التسرُّب.
2. التأكد من أن الدائرة المُراد فحصها غير مُكهربة وعدم وجود احتمالية لكهربتها أثناء الفحص.
3. تجنب لمس دائرة الفحص أثناء إجراء الفحص أو بعده، إلا بعد التأكد من عدم وجود فولتية وأن الملفات تم تفريغها من الشحنات المخزنة تماماً.
4. التأكد من أن أسلاك التوصيل الخاصة بجهاز الفحص (Test leads) وكذلك المشابك الخاصة بها (Clamps) في حالة جيدة وغير متسحة ولا تعالي من أية أضرار فيزيائية كالشقوق أو الكسور.
5. التأكد من أن جهاز الفحص المُراد استخدامه مُعاير (Calibrated).
6. قبل البدء بالفحص يُفصّل التعرف على أجزاء جهاز الفحص من شاشة ومنافذ وأزرار ومفاتيح تحكم ولمبات إشارة كما هو مُبين بالأشكال (7-1-2&3).



الشكل رقم (7-1-2)




الشكل رقم (7-1-3)

7. تهيئة منطقة الفحص عبر مراعاة الأمور التالية:
 - 7.1 التأكد من أن منطقة الفحص جافة قدر الإمكان.
 - 7.2 التأكد من عدم وجود مواد قابلة للإشتعال في منطقة الفحص.
 - 7.3 التأكد من التهوية الجيدة لمنطقة الفحص فيما إذا كانت مغلقة.
 - 7.4 التأكد من سلامة نظام التأريض في منطقة الفحص.
 - 7.5 وضع حواجز حول منطقة الفحص وشواخص تفيد بوجود فحص دو فولتية وتيار خطير.
8. إحضار جهاز الفحص (TESTRAND 600) إلى الموقع مع مراعاة وضع الجهاز بالطل وعدم تعريضه لأشعة الشمس المباشرة لوقت طويل، حيث أن الحرارة التشغيلية للجهاز يجب ألا تزيد عن (55°) درجة مئوية، وفي حال كانت الحرارة أكثر من (40°) درجة مئوية يجب الرجوع للكتيب التفصيلي (Manual) الخاص بجهاز الفحص لمعرفة التيار الأقصى الذي يُمكن حقنه من خلال الجهاز، وكذلك مراعاة جفاف أجزاء الجهاز جميعها قبل تشغيله.
9. التأكد من أن مفتاح التشغيل الخاص بجهاز الفحص رقم (3) في الشكل (7-1-2) على وضعية (OFF 0 -) الموضحة على المفتاح.
10. التأكد من ضغط زر إيقاف الفحص في حالات الطوارئ (Emergency Push Button) رقم (15) في الشكل (7-1-3).
11. وصل جهاز الفحص بالأرض (Local station earth) عبر منفذ التأريض رقم (1) في الشكل (7-1-2) بواسطة الكابل المورّد مع الجهاز من قِبَل الشركة المُصنعة أو بواسطة كابل تأريض لا يقل مساحة مقطعه العرضي عن (6 mm²) ملليمتر مربع أقرب ما يُمكن على مُشعل الجهاز لتقليل معاوقة التأريض (Impedance) قدر المستطاع.
12. التأكد من أن حزان المحول موصول بالأرض (Local station earth) عبر مسار تأريض دو مُعاوقة قليلة (Low Impedance).
13. التأكد من أن كابل الأرضي لمصدر الطاقة الكهربائي الخاص بجهاز الفحص موصول بالأرض (Local station earth) بمُعاوقة قليلة (Low Impedance).

14. توصيل جهاز الفحص بمصدر الطاقة الكهربائية عبر المنفذ رقم (2) في الشكل (7-1-2) بحيث يتم وصل كابل الطاقة بجهاز الفحص أولاً ومن ثم بالمصدر الكهربائي.
15. تشغيل الجهاز بواسطة مفتاح التشغيل رقم (3) في الشكل (7-1-2) عن طريق تغيير وضعيته من (0) إلى (1) الموضحة على المفتاح.
16. ملاحظة إنارة كل من لمبة الإشارة خضراء اللون رقم (18) والحلقة الزرقاء حول زر بدء/إيقاف الفحص (Start/Stop) في الشكل (7-1-3) وهذا يعني أن الجهاز لا يحقن تيار ولا فولتية كما يظهر في الشكل (7-1-4).



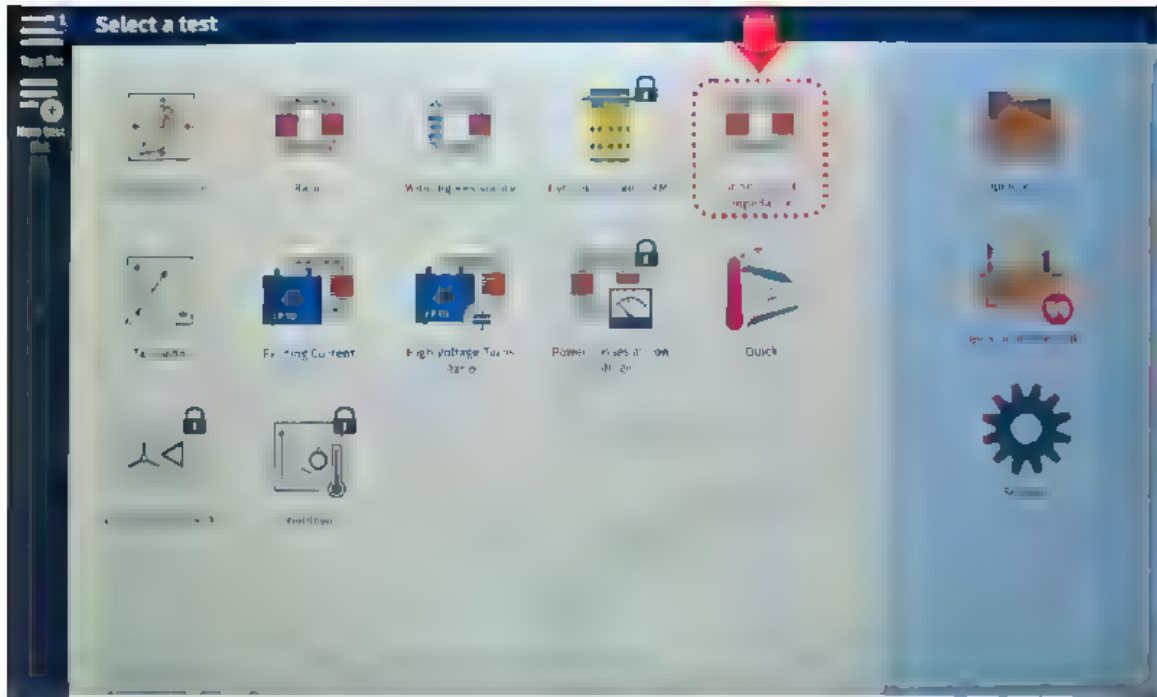
الشكل رقم (7-1-4)

17. في حال كان هناك مشكلة ما في التأسيس سوف تظهر رسالة على الشاشة تُفيد بذلك وستظهر العلامة التالية أسفل الشاشة . وفي حال عدم إنارة أي ضوء تحذيري أو ظهور أية رسائل تحذيرية على الشاشة فإن ذلك يعني أن الأرضي والجهاز سليمين والجهاز مُهيأ لعمل باقي التوصيلات والبدء بالفحص.


ملحوظة: يُتيح جهاز الفحص (TESTRANO 600) إمكانية ضبط إعدادات الفحص و إجراؤه بطريقتين، الطريقة الأولى بواسطة شاشة اللمس (Touch Control) مباشرة، و الطريقة الثانية بواسطة توصيل جهاز الحاسوب بجهاز الفحص (TESTRANO 600) و القيام بالفحص عبر برنامج (Primary Test Manger - PTM). حيث سيتم التطرُّق للطريقة الأولى فقط في هذا الملحق.

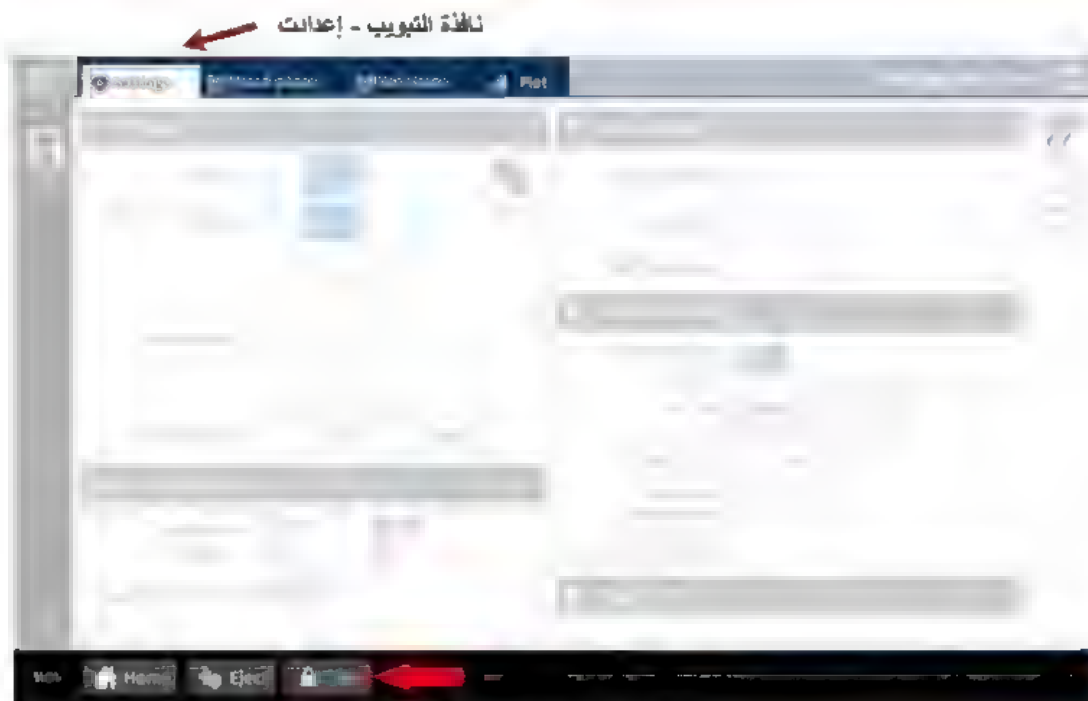


18. إختيار فحص مُفاعلة التسرُّب (Leakage Reactance) أو مُعاوقة القِصَر (Short Circuit Impedance) من القائمة الرئيسية الطاهرة على شاشة اللمس (Touch Control) والمُبيّنة في الشكل (7-1-5)، حيث أن إسم الفحص يعتمد على الإِيعار المُعتمد لجهاز الفحص والذي يُمكن تحديده ضمن إعدادات جهاز الفحص فبالرجوع إلى معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE) فإن هذا الفحص يُسمى فحص مُفاعلة التسرُّب (Leakage Reactance) أما فيما يخص اللجنة الكهروتقنية الدولية (IEC) فإن هذا الفحص يُسمى فحص مُعاوقة القِصَر (Short circuit impedance).



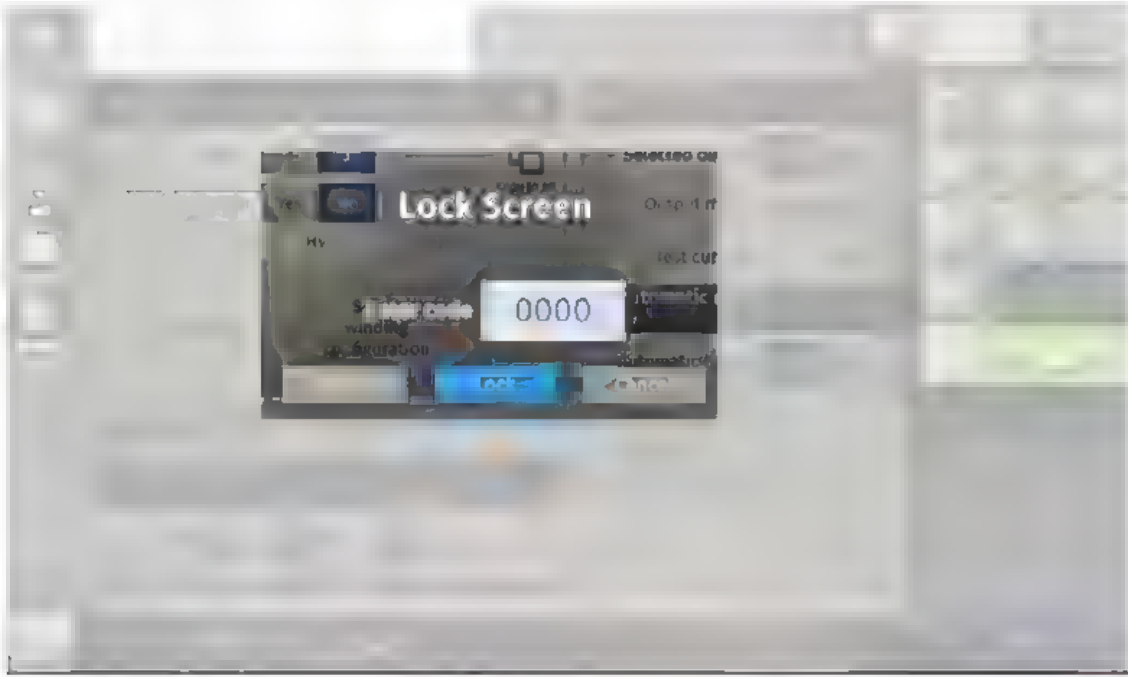
الشكل رقم (7-1-5)

19. بعد ذلك تظهر الشاشة المبينة في الشكل (7-1-6) والتي تكون بالبداية على نافذة التبريد إعدادات (Settings). نقوم بعمل قفل (Software Lock) للحفاظ على الوضعية الآمنة أثناء عمل التوصيلة المناسبة للفحص، وذلك بالضغط على زر القفل الظاهر أسفل الشاشة  كما هو مبين في الشكل (7-1-6)



الشكل رقم (7-1-6)

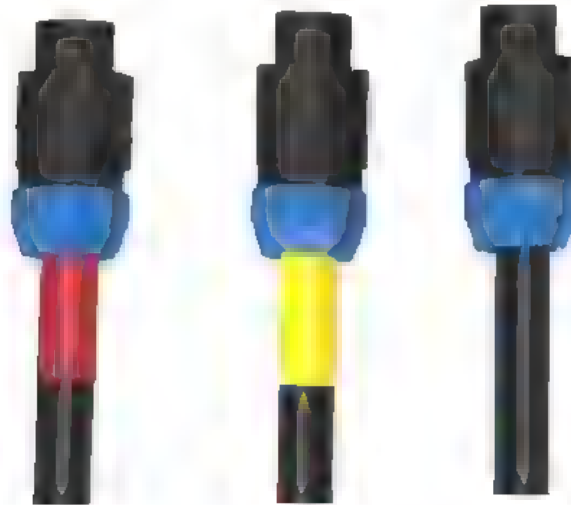
20. بعد الضغط على زر القفل (Lock) المُبين في الشكل السابق تظهر النافذة الفرعية المُبينة في الشكل (7-1-7)، ثم نقوم بإدخال كود رياضي والضغط على كلمة (Lock). وبذلك نكون قد وصلنا للوضع الآمن للجهاز.



الشكل رقم (7-1-7)

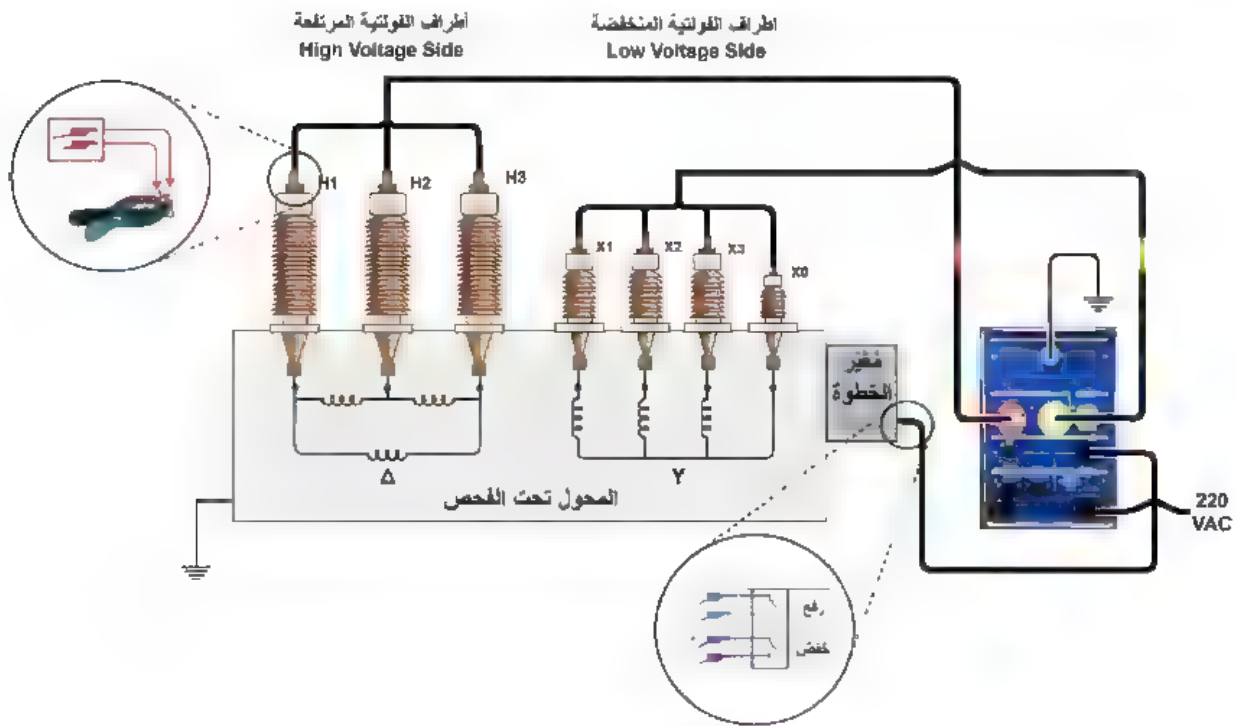
21 توصيل الكوابل الظاهرة في الشكل (7-1-8) بجهاز الفحص عبر المنافذ المُبينة في الشكل (7-1-2) كالآتي:

- 21.1 توصيل كابل الفولتية المرتفعة (الأحمر) بالمنفذ رقم (4) المُبين في الشكل (7-1-2).
- 21.2 توصيل كابل الفولتية المنخفضة (الأصفر) بالمنفذ رقم (9) المُبين في الشكل (7-1-2).
- 21.3 توصيل كابل مُغَيِّر الخطوة (الأسود) بالمنفذ رقم (7) المُبين في الشكل (7-1-2)



الشكل رقم (7-1-8)

22. توصيل كوابل جهار المحص بالمحول وفقاً للتوصيلة المُبينة بالشكل (7-1-9).



الشكل، رقم (7-1-9)

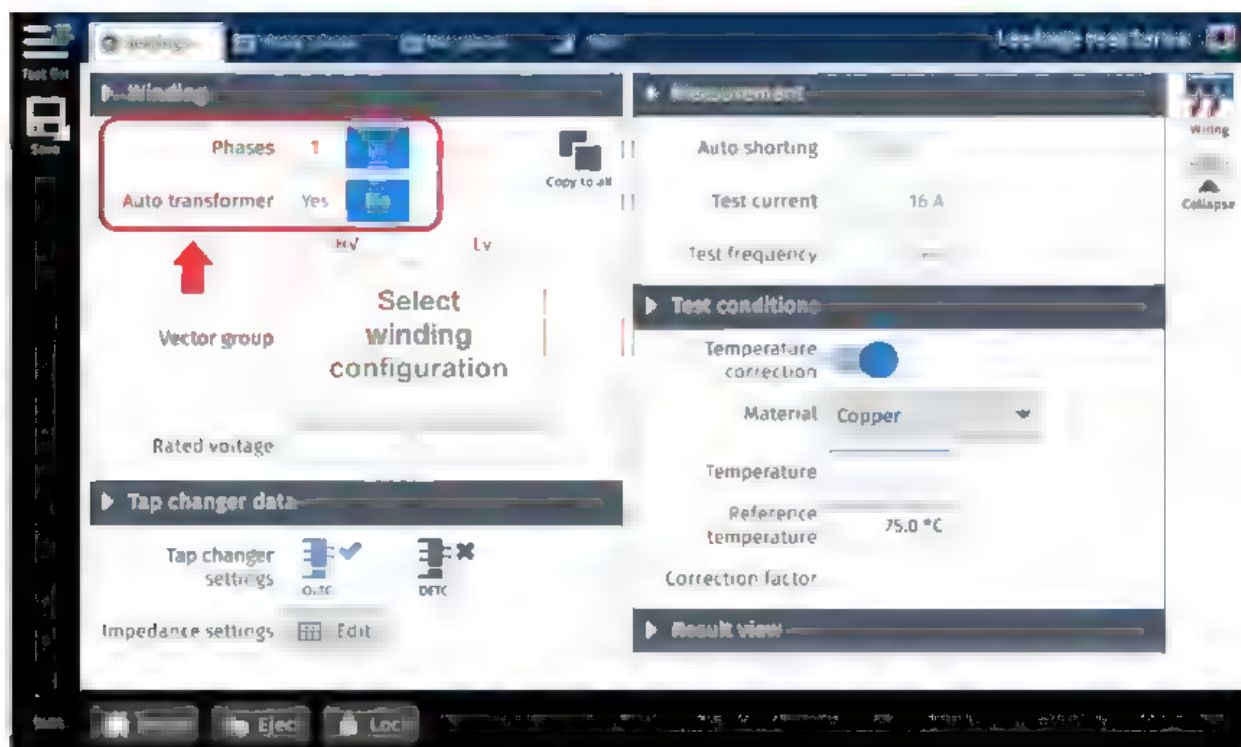
23. إرجاع الطاقة الكهربائية لمُغَيِّر الخطوة (Tap-changer) فيما إذا كانت معصولة.

24. التأكد من نصب حواجز السلامة بالإضافة للشواخص التحذيرية.

25. بعد الإنتهاء من التوصيلة كاملة، نقوم بتحرير (Release) زر إيقاف المحص في حالة الطوارئ (Emergency Stop Button).

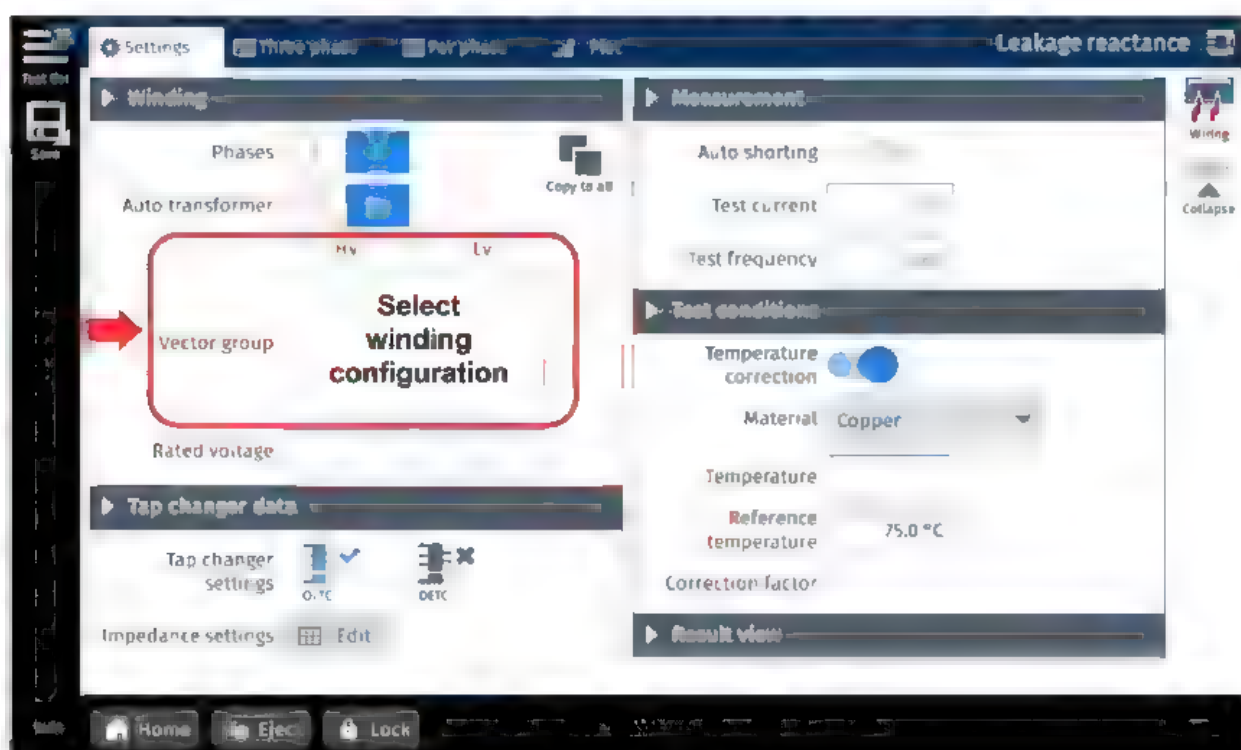
26. الرجوع لشاشة اللمس وإزالة قفل الشاشة عبر إدخال الكود الرباعي والضغط على أيقونة الإدخال ويمكن كذلك إزالة قفل الشاشة عبر إطفاء الجهاز وتشغيله مرة أخرى.

27. من الشاشة الطاهرة في الشكل (7-1-10) والتي تكون بالبداية على نافذة التبويب إعدادات (Settings) يتم تحديد عدد أطوار المحول المُراد فحصه بالضغط على الرقم (3) أي أنه ثلاثي الطور (3 phase transformer)، ثم يتم الضغط على (No) بجانب المحول التلقائي (Auto Transformer).



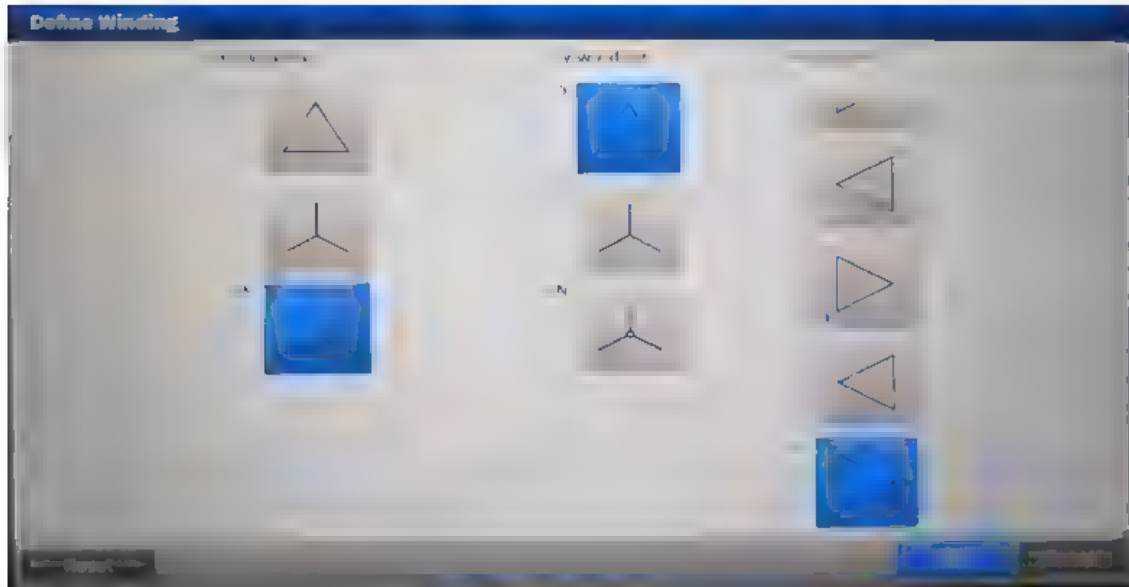
الشكل رقم (7-1-10)

28. يقوم بتحديد مجموعة التوصيل (Vector group) الخاص بالمحول المُراد فحصه وذلك بالضغط على حملة إختار مجموعة التوصيل (Select winding configuration) الظاهرة على الشاشة والمُبيّنة في الشكل (7-1-11) لتظهر لنا شاشة تحديد مجموعة التوصيل.



الشكل رقم (7-1-11)

29. من شاشة تحديد مجموعة التوصيل الظاهرة في الشكل (7-1-12) يقوم بتحديد مجموعة التوصيل الخاصة بالمحول الفراد فحصة، حيث تم تحديد المجموعة (YNd11) كمثال ثم الضغط على زر حفظ (Save)



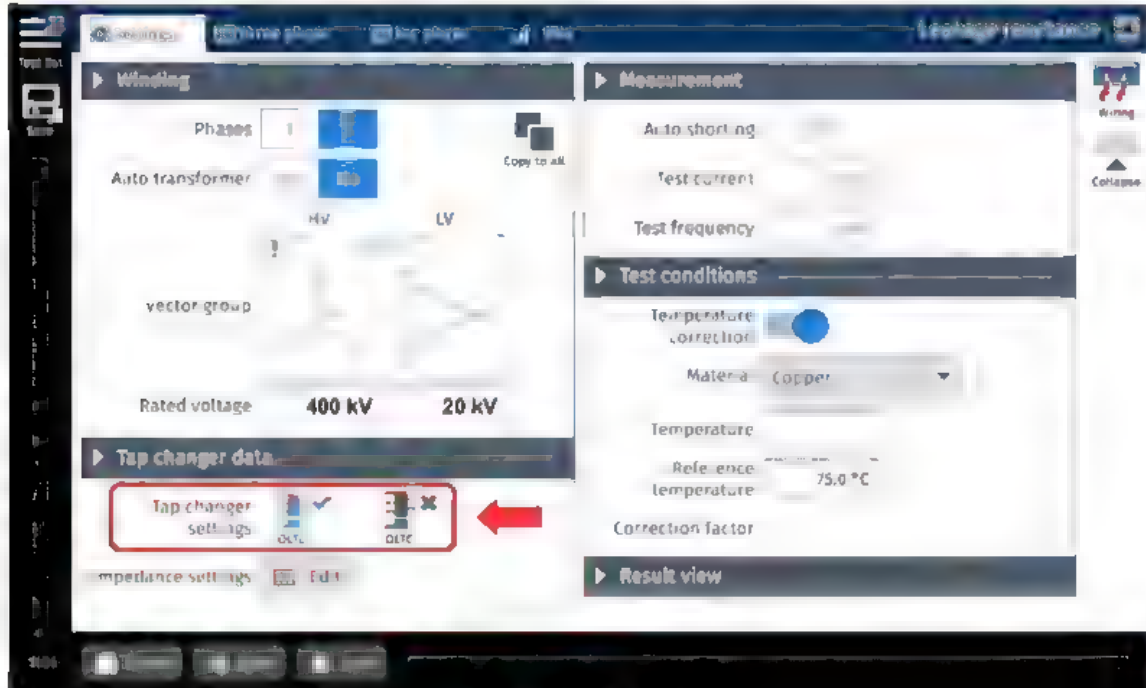
الشكل رقم (7-4-12)

30. تحديد الفولتية الإسمية للمحول الفراد فحصة وذلك بإدخال قيمة هذه الفولتية بالمكان المخصص لها كما هو مبين بالشكل (7-1-13).

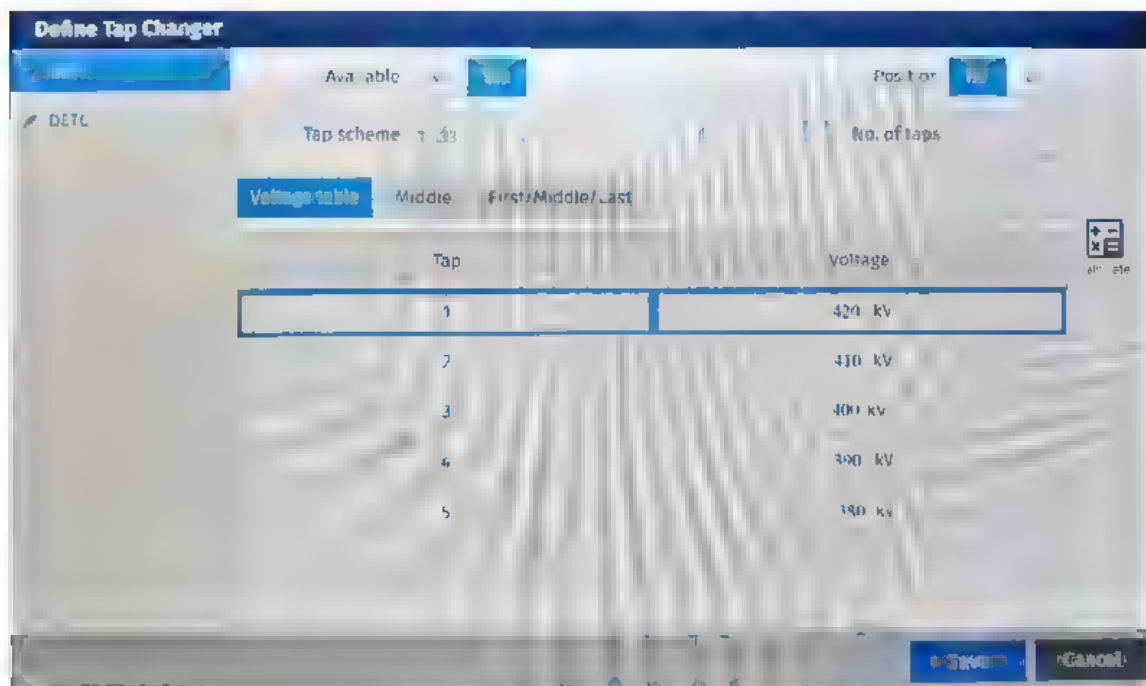


الشكل رقم (7-1-13)

31. تحديد نوع مُغيّر الخطوة (Tap Changer) فيما إذا كان (OLTC أو DETC)، وفي حالتنا هذه نقوم باختيار (OLTC) وذلك بالضغط عليها كما هو مُبين بالشكل (7-1-14) لتظهر لنا النافذة المبينة في الشكل (7-1-15) والتي من خلالها يُمكن إدخال المعلومات الخاصة بُمغيّر الخطوة (tap changer) ومن ثم الضغط على زر حفظ (Save).

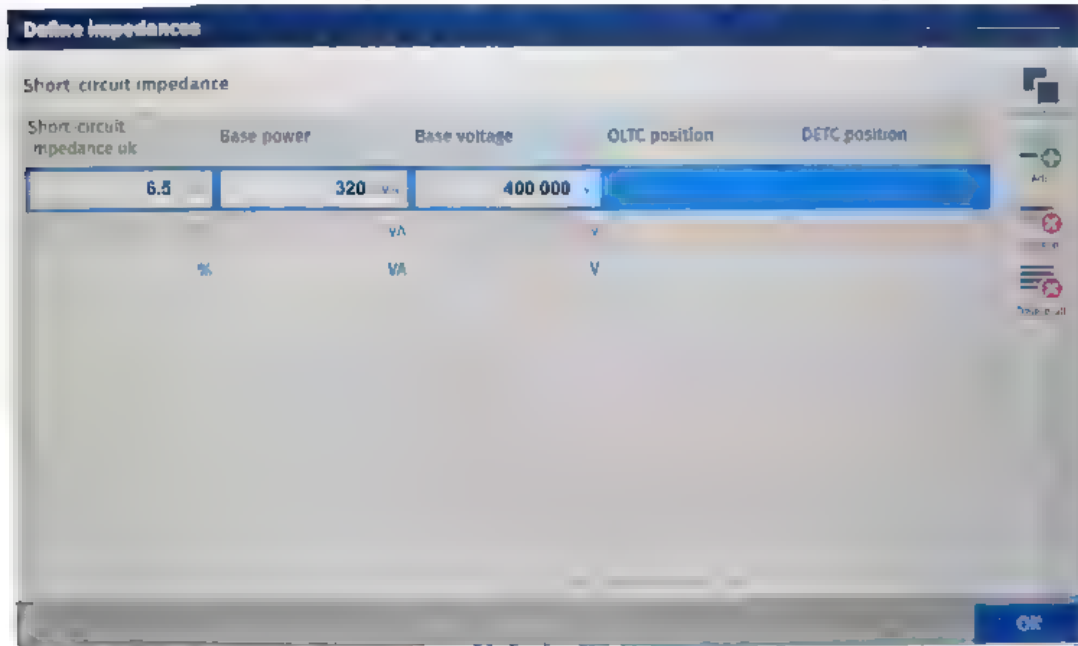


الشكل رقم (7-1-14)



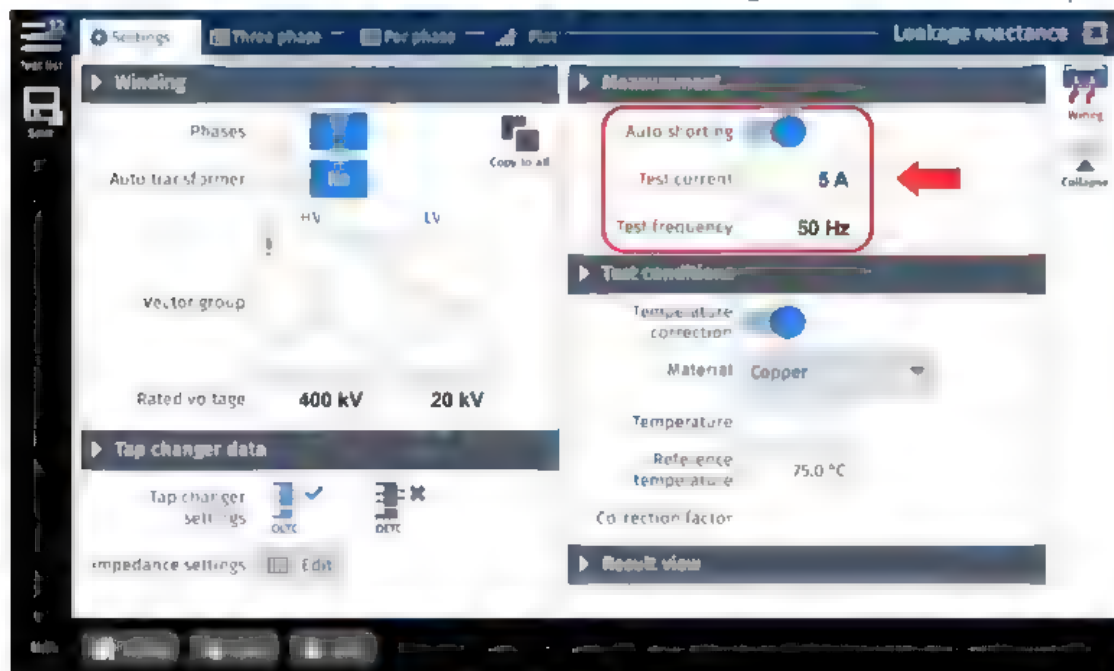
الشكل رقم (7-1-15)

32. إدراج قيمة مُعاوقة القِصر (Short circuit Impedance) بالإضافة لقيمة القدرة الظاهرية للمحول وفولتية الخطوة (Tap Voltage) ورقم الخطوة (Tap number) وذلك بالضغط على كلمة تعديل (EDIT) الظاهرة في الشكل (7-1-14) لتظهر لنا المافذة المبينة في الشكل (7-1-16)



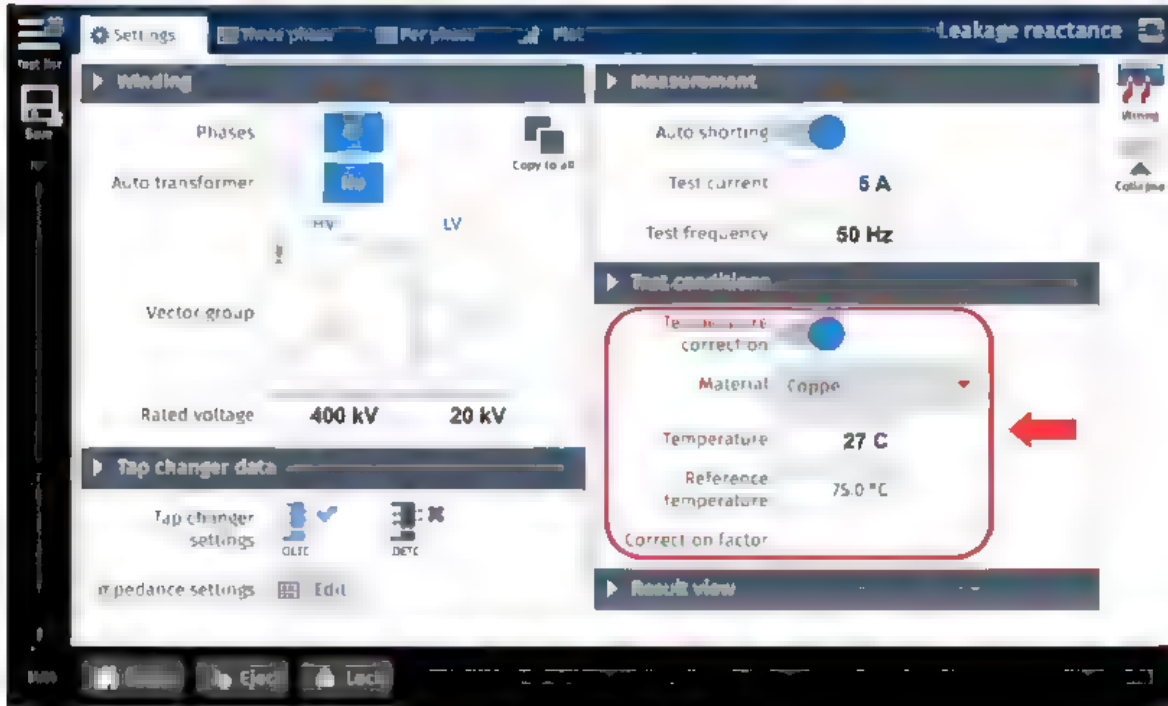
الشكل رقم (7-1-16)

33. تحديد آلية إجراء دائرة قِصر لملفات المحول ذات الفولتية المُتخففة بحيث يُمكن إجراؤها بشكل يدوي (Manual) أو تلقائي (Auto shorting)، ويُفضّل إحراء دائرة القِصر بشكل تلقائي (Auto) وذلك بتفعيل الشريط بجانب كلمة القِصر التلقائي (Auto shorting) وذلك بالضغط عليه ليتحول لونه للأزرق، بالإضافة لتحديد قيمة تيار الفحص (يُمكن ضبط هذا القيمة على 5 أمبير) وكذلك التردد يتم تحديده (50 هيرتز) كما هو مُبين بالشكل (7-1-17).



الشكل رقم (7-1-17)

34. تفعيل خاصية تصحيح القيمة المُقاسة لدرجة الحرارة القياسية المرجعية (75°) درجة مئوية مثلاً وذلك بالضغط على الشريط بجانب كلمة تصحيح الحرارة (Temperature Correction) ليتحول لونه للأزرق، بعد ذلك نقوم بإدخال درجة حرارة المحول أثناء الفحص بالإضافة لنوع المادة المكوّنة للملفات وعادة ما تكون من النحاس (Copper) كما هو مبين بالشكل (7-1-18).

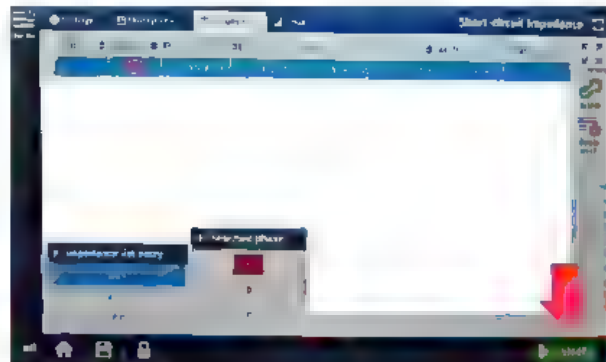
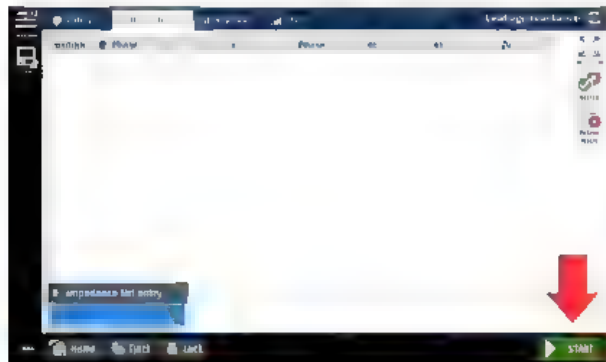


الشكل رقم (7-1-18)


35. بعد ذلك نقوم بالانتقال إلى نافذة التبويب الثانية (Three phase) في حال أردنا إجراء الفحص بالأسلوب ثلاثي الطور المكافئ، أو الانتقال لنافذة التبويب الأخرى (Per phase) وذلك لإجراء الفحص بالأسلوب أحادي الطور، وبعد اختيار أسلوب الفحص بواسطة الضغط على نافذة التبويب المناسبة وظهور إحدى الشاشتين المبينتين في الشكل (7-1-19) ولبدء الفحص، نقوم بالضغط على زر يبدأ (Start) أسفل يمين الشاشة والتأكد من إضاءة الحلقة الزرقاء حول زر (Start/Stop) (Start/Stop) الظاهر في الشكل (7-1-4) وبذلك يكون الجهاز بوضعية الاستعداد للحقن.

Three phase

Per phase

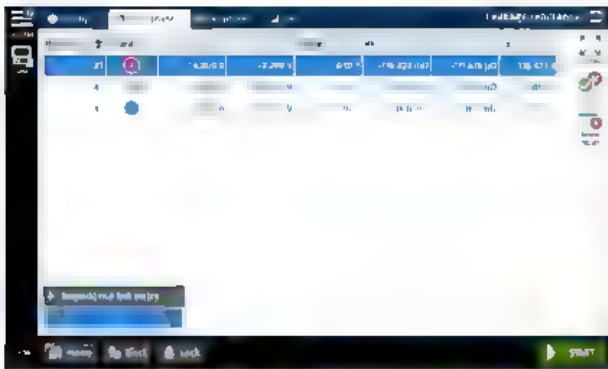


الشكل رقم (7-1-19)

36. الضغط على زر إبدء/توقف (Start/Stop) الطاهر في الشكل (7-1-4) ليبدأ الفحص ويتم الحقن الفعلي للتيار ويبدأ الصوت الأحمر  والحلقة الزرقاء حول زر (Start/Stop) بالوميض بشكل متقطع.

37. بعد الإنتهاء من الفحص يومض الضوء الأخضر  وبعدها يُمكن إيجاد النتائج في علامة التبويب أحادي أو ثلاثي الطور (Tree/Per phase) كما هو مُبين بالشكل (7-1-20) وبذلك يكون قد إنتهى الفحص.

Three phase



Per phase



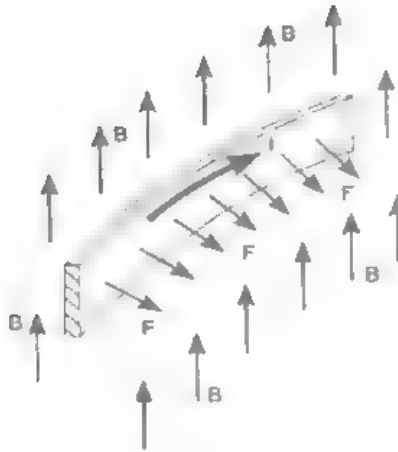
الشكل رقم (7-1-20)

تحذير: لا تُقُم بإزالة أسلاك الفحص إلى بعد التأكد من أن لمبة الإشارة التحذيرية الحمراء على الواجهة الأمامية (الرئيسية) لجهاز الفحص مُطفئة (OFF) ولمبات الإشار التحذيرية على الواجهة الجانبية لجهاز الفحص مُطفئة أيضاً (OFF)، وكذلك لمبة الإشارة الخضراء على الواجهة الأمامية (الرئيسية) لجهاز الفحص مُضيئة (ON).



الملحق (7-2)

كما هو معلوم أن الموصلات الحاملة للتيار والواقعة في مجال مغناطيسي تتعرض لقوى ميكانيكية شتى طبقاً لقانون ليز (قاعدة اليد اليمنى)، لذلك عند تصميم المحولات يتم أخذ هذه القوى بعين الاعتبار ليتمكن المحول من تحمّل هذه القوى والإجهادات الميكانيكية أثناء حدوث الأعطال وأثناء الظروف التشغيلية الطبيعية، ولكن قد تزداد قيمة هذه القوى المؤثرة عن الملفات فوق الحدود المسموح بها نتيجة لمرور تيارات عطل بقيم مرتفعة مما يؤدي لظهور قوى كهرومغناطيسية (Electromagnetic forces) كبيرة محدثة تشوّه للملفات. حيث تعتمد قيمة هذه القوى على قيمة التيار المار في هذه الموصلات الواقعة ضمن مجال مغناطيسي (Magnetic Field) كما هو مبين بالشكل (7-2-1) والمعادلة (7.21).



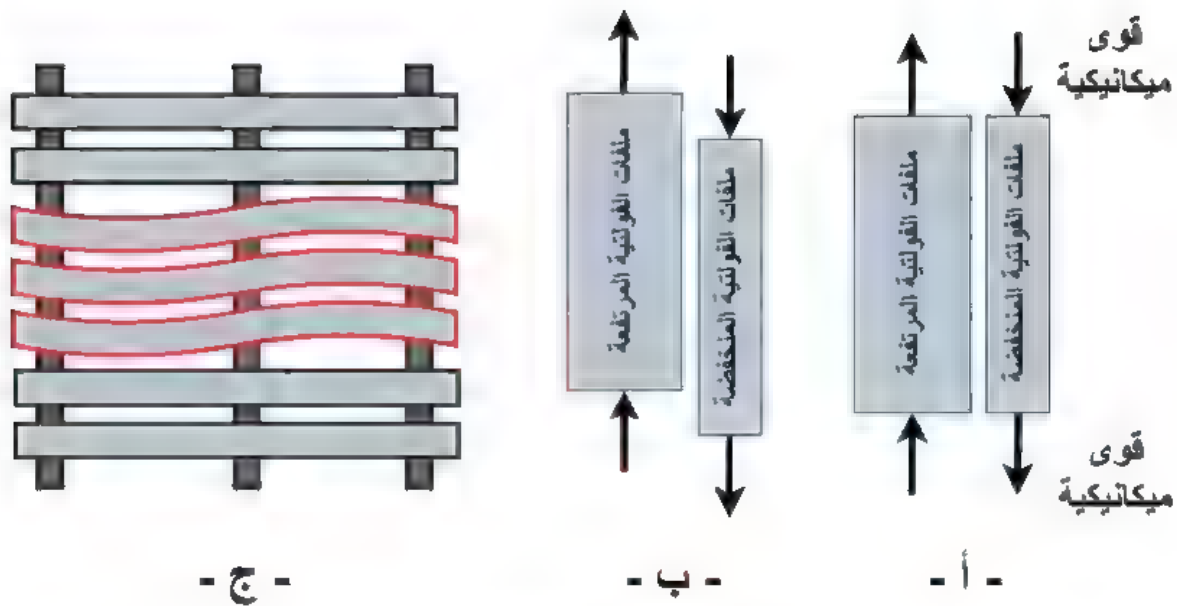
الشكل رقم (7-2-1)

$$\vec{F} = I \int d\vec{l} \times \vec{B} \quad (7.21)$$

حيث (I) يمثل التيار المُتجهي (Current vector) بالأُصير (A) و (l) يُمثل طول الموصل بالمتر (m) و (B) يُمثل كثافة الفيض المغناطيسي المُتجهي (Flux density vector) بالتسلا، ففي حال مرور تيارات مرتفعة المقدار كتيارات العطل (القِصر) أو تيارات البدء (Inrush currents) سيؤدي ذلك لزيادة القوى المؤثرة على الملفات مما ينتج عنه تشوّه في البنية الفيزيائية للملفات، وهذا التشوّه يتلخص بالأنواع التالية لا حصراً:

✓ التشوّه المحوري (Axial Deformation)

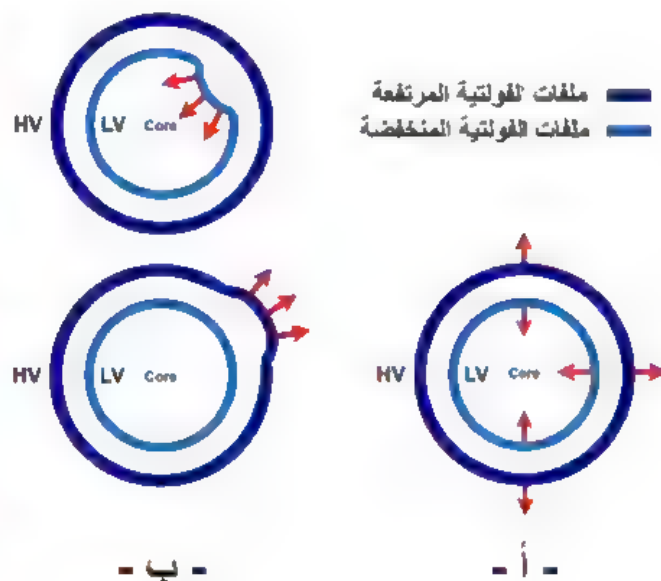
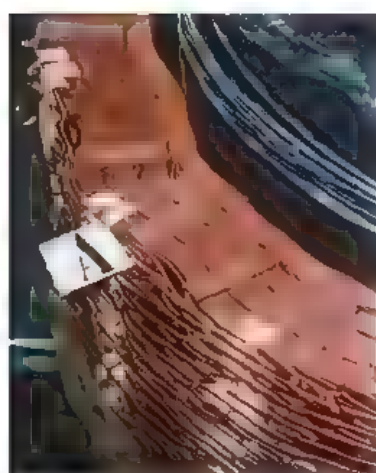
ويظهر هذا النوع من تشوّه الملفات نتيجة لتعرضها لقوى محورية (Axial Forces) قد تؤدي لتشوّه ملفات العولتية المرتفعة و المنخفضة كإزاحتها وفقدانها للمحاداة فيما بينها كما يظهر بالشكل (7-2-2).



الشكل رقم (7-2-2)

✓ التشوه الشعاعي/القطري (Radial Deformation)

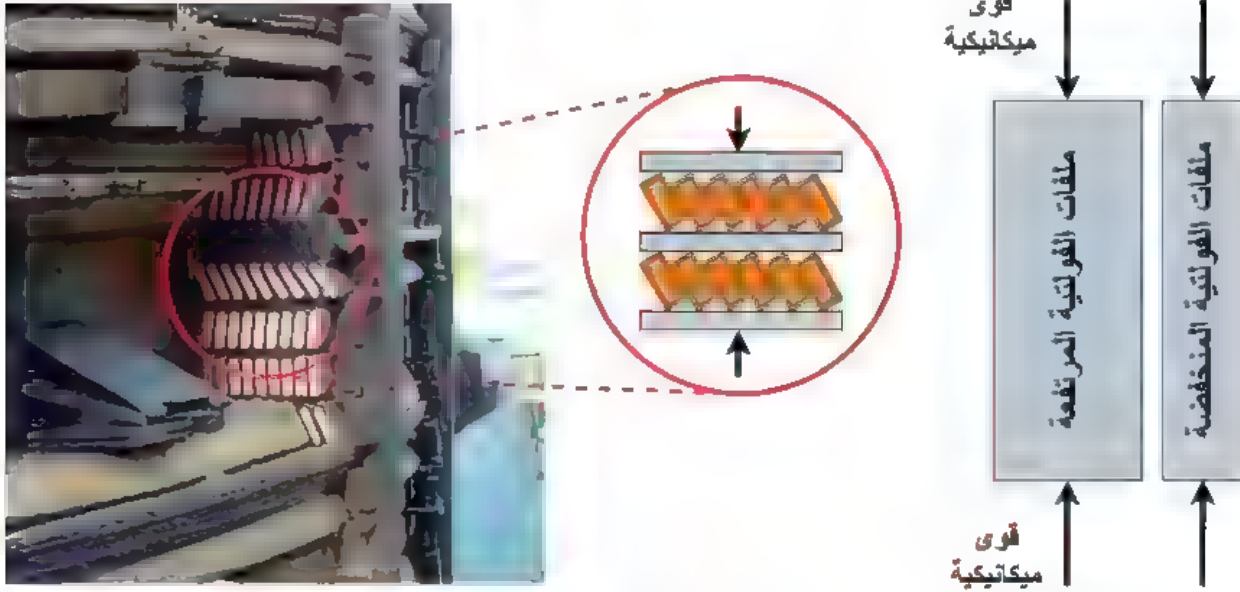
ويظهر هذا النوع من تشوه الملفات نتيجة لتعرضها لقوى شعاعية قُطرية (Radial Forces) قد تؤدي لتشوه ملفات الفولتية المرتفعة أو المنخفضة كما يظهر بالشكل (7-2-3) الذي يُظهر النوع الحر من التشوه (Free buckling) بالإضافة لنوع آخر وهو التشوه القسري (Forced buckling).



الشكل رقم (7-2-3)

✓ ميلان الموصلات – Conductor Tilting

ويظهر هذا النوع من تشوه الملفات نتيجة لتعرضها لقوى ضغط تؤثر على ملفات العولتية المرتفعة أو المنخفضة نفسها والذي بدوره يؤدي لتشوه بُنية الملفات الداخلية كما هو مُبين بالشكل (7-2-4).



الشكل رقم (7-2-4)

بالإضافة لأنواع كثير مختلفة من تشوهات الملفات والتي قد لا تؤثر بشكل لحظي على أداء المحول، ولكنها ستؤدي إلى تغيير إجهاد العولتية (Voltage stress) للمادة العازلة مُحْدِثَةً تفريغ حرثي (Partial discharge) من شأنه إضعاف وفشل هذه المادة العازلة مما يؤدي إلى حدوث أعطال مثل قصر بين لفات المحول (Turn to turn fault) في الغالب، ومن الجدير بالذكر أنه للمحولات ذات القلب الحديدي ثلاثي الأعمدة (Core type) والملفات من النوع (Concentric) فإن الإزاحة أو التشوه المحوري (Axial) يُعد أكثر خطورة من نظيره الشعاعي/القطري (Radial) وقد يؤدي إلى فشل المحول بشكل كبير وخطر.

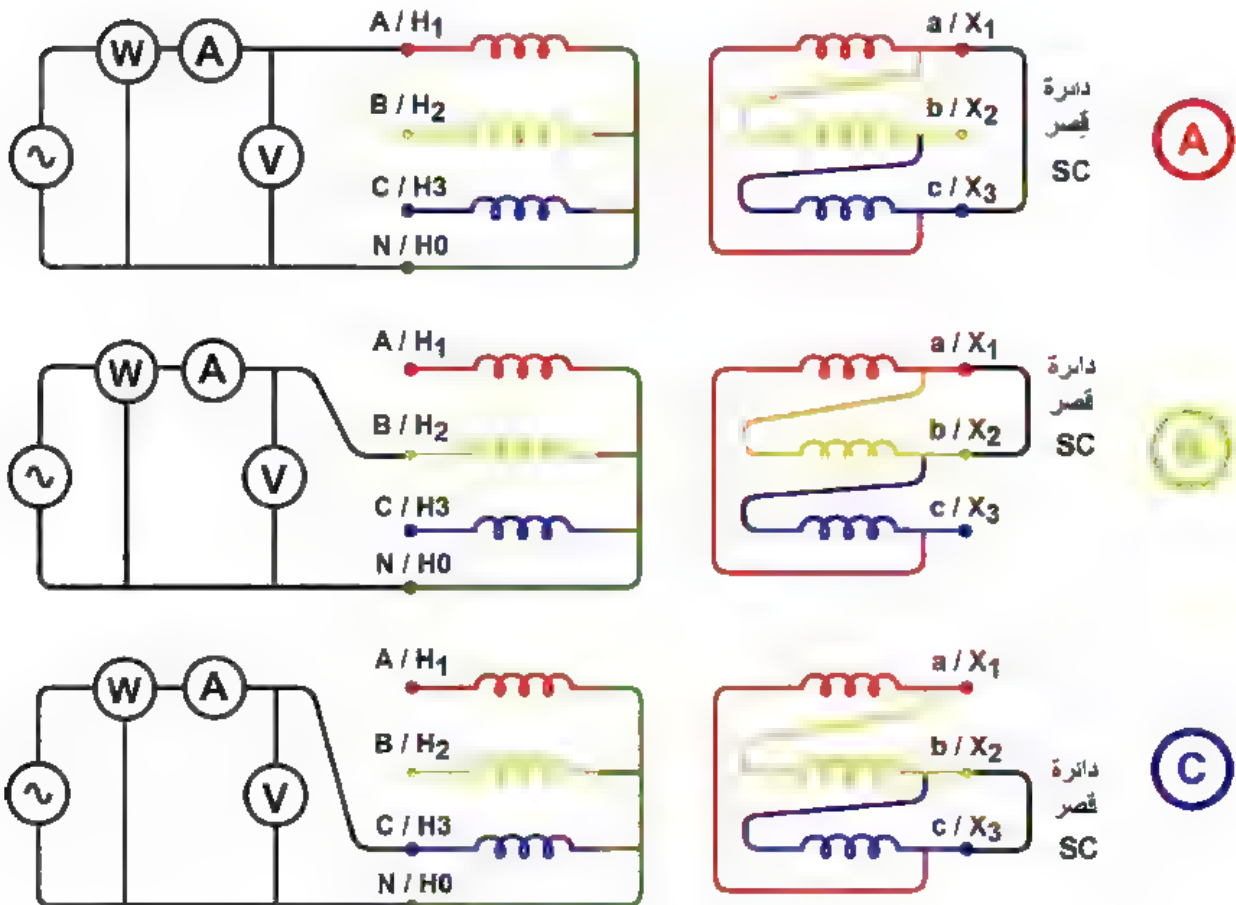
الملحق (7-3)

يُضم هذا الملحق التوصيلات الخاصة بفحص مُفاعلة التسرب (Leakage Reactance) بالأسلوب أحادي الطور (Per phase test) لبعض مجموعات توصيل المحول (Connection group).

● مجموعة التوصيل YNd11 –

الجدول رقم (7-3-1)

مجموعة التوصيل (YNd11)	
الأطراف التي يجب تطبيق الفولتية عليها	الأطراف الواجب قصرها (SC)
H1 – H0	X1 – X3
H2 – H0	X2 – X1
H3 – H0	X3 – X2

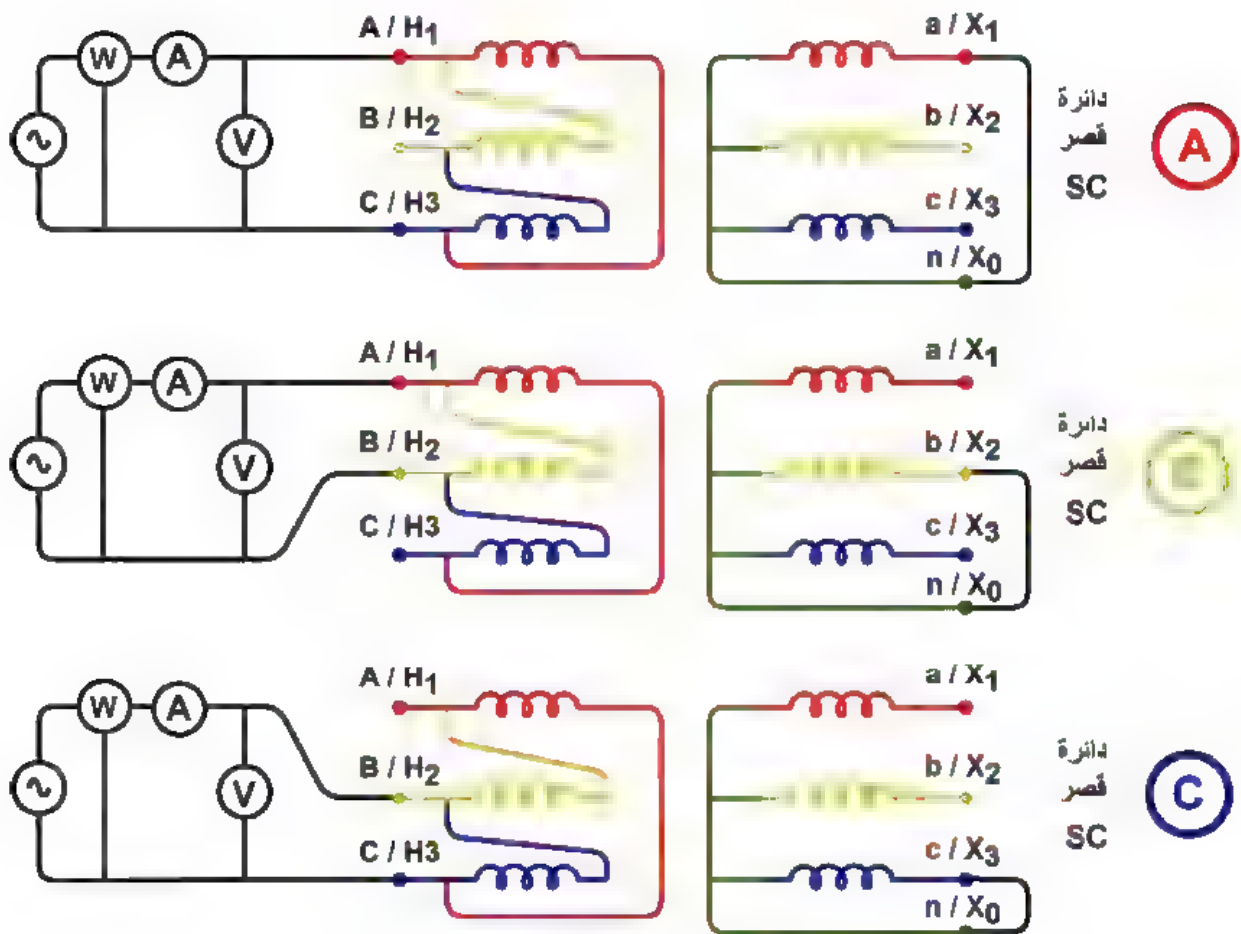


الشكل رقم (7-3-1)

• مجموعة التوصيل – Dyn1

الجدول رقم (7-3-2)

مجموعة التوصيل (Dyn1)	
الأطراف التي يجب تطبيق الفولتية عليها	الأطراف الواجب قصرها (SC)
H1 - H3	X1 - X0
H2 - H1	X2 - X0
H3 - H2	X3 - X0



الشكل رقم (7-3-2)

الفصل الثامن

فحص تحليل الإستجابة الترددية المسحي

Sweep Frequency Response Analysis
Test (SFRA)



فحص تحليل الإستجابة الترددية المَسْحي

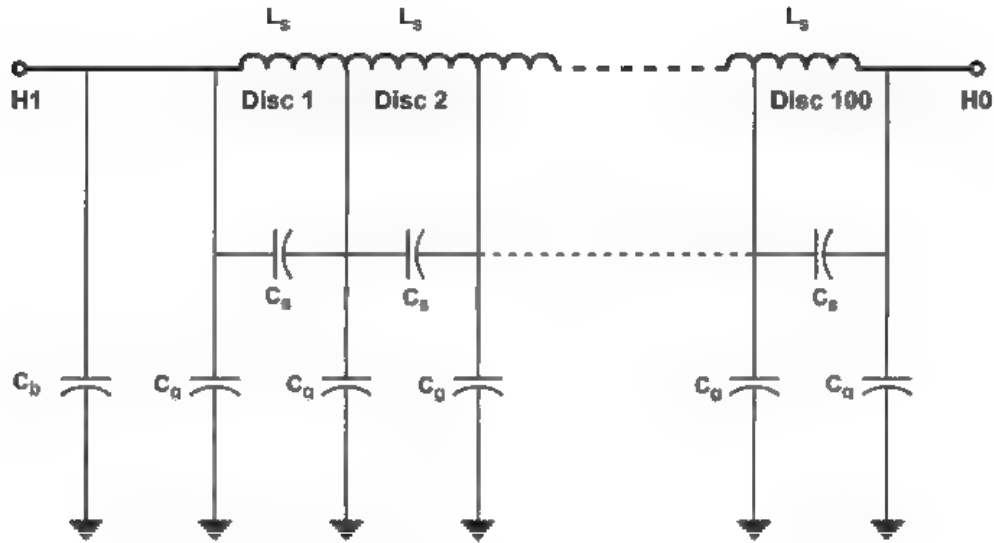
Sweep Frequency Response Analysis (SFRA)

يُعتبر فحص تحليل الإستجابة الترددية المَسْحي (SFRA) من الفحوصات التي يتم الإعتماد عليها في الكشف عن التشوّهات التي تطرأ على ملفات المحول بشكل أساسي والتي يصعب الكشف عنها بواسطة الفحوصات التقليدية كفحص نسبة عدد اللفات (TTR) أو مقاومة الملفات (WRM) أو تيار التهيج (Excitation current)، حيث أن هذا الفحص بالإضافة لفحص مُفاعلة التسرب (Leakage reactance) وفحص الفولتية المحفّضة النبضي أو الدفعي (Low voltage impulse test - LVI) من الفحوصات الحساسة لتشوّهات الملفات كلاً بدرجة مُعيّنة من الحساسية بالإضافة لمجموعة من المرايا والعيوب لكل فحص من هذه الفحوصات والتي تميزها عن بعضها البعض.

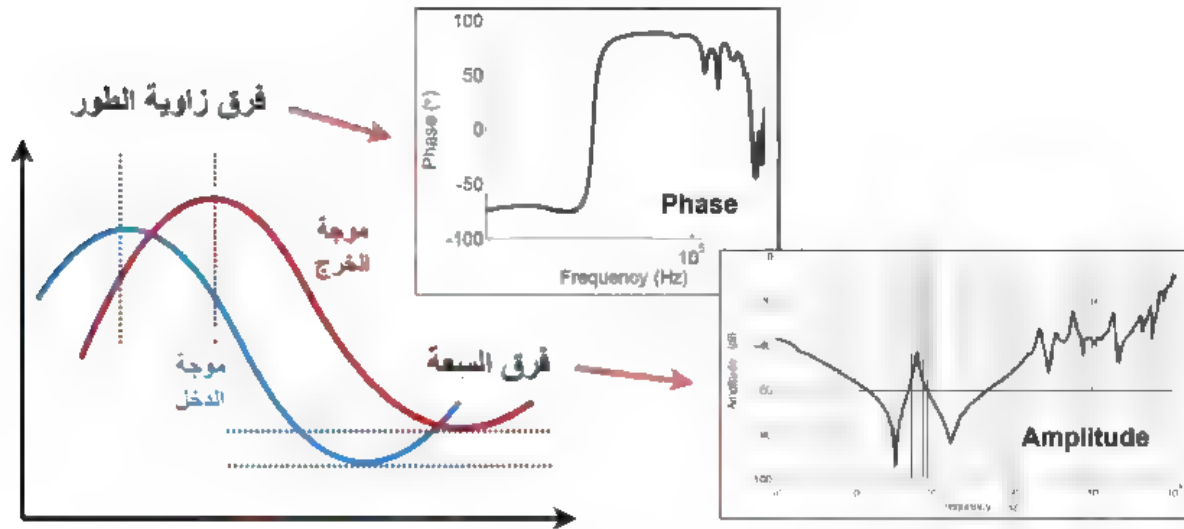
فكما هو معلوم يُمكن تمثيل أو نمذجة المحول (Transformer modeling) بواسطة منظومة من المقاومات المادية (R) كمقاومة الملفات بالإضافة للمحاثات (L_s) كمحاثات الملفات أيضاً بالإضافة للمواسعات (C) كالمواسعة بين أقراص الملفات (Winding discs) والتي يُشار إليها بـ (C_g) أو بين الملفات والأجزاء المؤرضة كالقلب الحديدي وخزان المحول (C_g) أو بين الموصل الوسطي المار بعوازل الإختراق وخزان المحول المؤرض (C_b) وغيرها من الأجزاء التي يُمكن تمثيلها بواسطة هذه المركبات كما هو مُبين بالشكل (8-1)، وفي حال حدوث تغيّر ميكانيكي على الملفات أو القلب الحديدي فإن هذه المنظومة من المقاومات والمحاثات والمواسعات ستختلف وفق نمط معيّن تبعاً لنوع العطل مما يعكس على نتيجة هذا الفحص ويدلّ على وجود هذا النوع من الأعطال، حيث أن الإستجابة الترددية (Frequency Response - FR) تكون بدلالة المركبات المُكوّنة لمنظومة المحول (RLC) وأي إختلاف في هذه المركبات سيؤثر على هذه الإستجابة الترددية. ففي هذا الفحص يتم تطبيق موجة فولتية منخفضة جيبية بتردد مُتغيّر على أحد أطراف الملفات ويتم قياس هذه الموجة على طرف آخر لنفس الملف أو لملف آخر وفقاً لنمط الفحص المُتبع، ومنه يتم مقارنة نسبة الفولتية (Voltage ratio) وفرق الطور (Phase difference) لموحي فولتية المدخل (V_{in}) والمُخرج (V_{out}) ويتم رسمهما بيانياً نسبة للتردد (Frequency) كما هو مبين بالشكل (8-2). ونظراً لأن فولتية الفحص أقل من قيمة الفولتية الإسمية للمحول فإن هذا الفحص يُعد من الفحوصات غير التدميرية (Non-destructive test).

ملحوظة (8-1): إختلفت التسميات الخاصة بالقيمة المُقاسة، فقد تمت تسميتها بنسبة الفولتية (Voltage ratio) وأيضاً تُسمى بالسعة (Amplitude) أو المقدار (Magnitude) وعند ذكر أي من هذه التسميات في سياق الشرح فإن المقصود واحد.





الشكل رقم (8-1)



الشكل رقم (8-2)

وكما دُكر سابقاً فإن سلامة أي محول تتلخص في سلامة ثلاثة أنظمة داخلية للمحول وهي نظام العزل و النظام الميكانيكي والنظام الحراري، حيث أن أي فشل في أي من هذه الأنظمة سيؤدي إلى فشل المحول بالكامل، وهذا الفحص يُمكن من الكشف عن سلامة النظام الميكانيكي وذلك بالكشف عن أي تشوه أو إزاحة لملفات أو قلب المحول الحديدي.

1. متى يتم إجراء هذا الفحص ولماذا؟

هناك عدة أسباب تدفعنا لإجراء هذا الفحص ومن هذه الأسباب ما هو روتيني للتأكد من سلامة المحول أو تشخيصي لتحديد الأعطال في المحول (وهو مجال بحثنا في هذا الكتاب) أو لأسباب خاصة أخرى، وتتلخص هذه الأسباب بالآتي:

1.1 في المصنع لضبط الجودة القصصية (Quality Control - QC) وكذلك يُعتبر من فحوصات القبول القصصية (Factory Acceptance Test - FAT) للتأكد من سلامة المحول ومطابقته للتصميم

قبل نقله للموقع، كما ويُتصح بإجراء هذا الفحص بعد فحص دائرة القصر المصنعي (Short circuit test) وذلك للتأكد من سلامة المحول بعد هذا الفحص.

1.2 في الموقع قبل كهرة المحول للمرة الأولى (Transformer first energization) كأحد فحوصات القبول الموقعية (Site Acceptance Test - SAT) للتأكد من سلامة المحول بعد نقله وتركيبه في الموقع.

1.3 قبل كهرة المحول (Transformer energization) بعد نقل المحول من مكان لآخر.

1.4 بشكل روتيني (Routine test) وذلك للكشف عن وضع المحول الحالي وإستخدام نتيجة هذا الفحص كمرجع (Reference value).

1.5 لغايات نمذجة الأنظمة (System Modeling)، حيث بواسطة هذا الفحص يُمكن إستخراج قيم بعض المركبات اللازمة لنمذجة دائرة المحول وغيره من الأنظمة.

1.6 تحديد الأعطال داخل المحول (Fault detection - Diagnostic test)، وهو ما سيتم تدوله في هذا الفصل.

2. الدوافع التشخيصية لعمل هذا الفحص وما هي الأعطال التي يتم الكشف عنها

كما هو معلوم أن هذا الفحص يهدف للكشف عن أي تشوّه أو إراحة للملفات ولقلب الحديدي للمحول، لذلك عادةً ما يتم اللجوء لعمل هذا الفحص بهدف تشخيصي في حال تعرّض المحول لطروف أو أحداث قد تؤدي لزيادة الإجهاد الميكانيكي الواقع على ملفات وقلب المحول وما يترتب عليها من أعطال ميكانيكية أو كهربائية للمحول، وعلى سبيل المثال لا الحصر يُمكن إيجاد الأمور التالية:

- تعرّض المحول لإجهاد ميكانيكي ناتج عن عطل كهربائي مثل الأعطال الأرضية (Earth faults) أو أعطال القصر (Short circuit) أو ضربات الرق (Lightning) وما ينتج عنها من تيارات ذات قيم مُرتفعة، أو تعرّض المحول لتيارات بدء (تدفق) مُرتفعة (High inrush currents).
- تعرّض المحول لفصل قسري (Trip) نتيجة لتفعل مُرحل البوخلز (Buchholz relay) أو مُرحل إرتفاع الضغط المفاجئ (Sudden pressure relay) أو غيره من الحماية الفيزيائية.
- إرتفاع درجة حرارة المحول أو ظهور قيم مُرتفعة ليسبب العارات القابلة للإحتراق الذائبة في زيت المحول (Dissolved combustible gas).
- قراءات غير جيدة لجهاز تسجيل الصدمات (Impact recorder) حيث أن هذه الجهاز يتم تثبيته على جسم المحول أثناء نقله للتأكد من عدم تعرضه للصدمات فوق الحدود المسموح بها كتعرّضه لصدمة ميكانيكية كبيرة كالسقوط أثناء عملية النقل.
- الهزات الناتجة عن الزلازل أو غيرها من الكوارث الطبيعية والتي قد تلحق ضرراً ميكانيكياً بالمحول.
- في حال الحصول على نتائج فحوصات غير مُرضية خاصة لفحص المواسعة (Capacitance) وفحص مُفاعلة التسرب (Leakage reactance) وفحص تيار التهيج (Excitation current).

ومن الأعطال التي يتم الكشف عنها من خلال هذا الفحص:

- وجود تشوّه أو إراحة للملفات ككل (Bulk winding deformation or displacement).
- وجود تشوّه في ملف من الملفات بشكل محوري أو شعاعي/قُطري (Coil axial or radial deformation).
- وجود تشوّه أو إراحة للقلب الحديدي (Core deformation or displacement).
- وجود قُطع في ملفات المحول (Open circuit).
- وجود قِصر (Short circuit) بين لفات الملفات المختلفة من المحول أو بين اللفات من نفس الملف.
- وجود كسري في دعائم التثبيت الداخلية أدى لحدوث تشوّه في الملفات والقلب الحديد.
- وجود مشكلة في تأريض القلب الحديدي أو فقدان التأريض.

وفي حال تعرّض المحول للصدمات أو الإهتزازات أو السقوط أثناء النقل فإنه يسهّل تصوّر السبب الذي أدى لتشوّه بُنية الملفات الفيبرائية، أما فيما يخصّ التشوّه الناتج عن التيارات المرتفعة كتيارات البدء (Inrush currents) والتيارات العُطل (Fault currents) ولهم آلية حدوثه يُمكن الرجوع للملحق (7-2) من الفصل السابق.

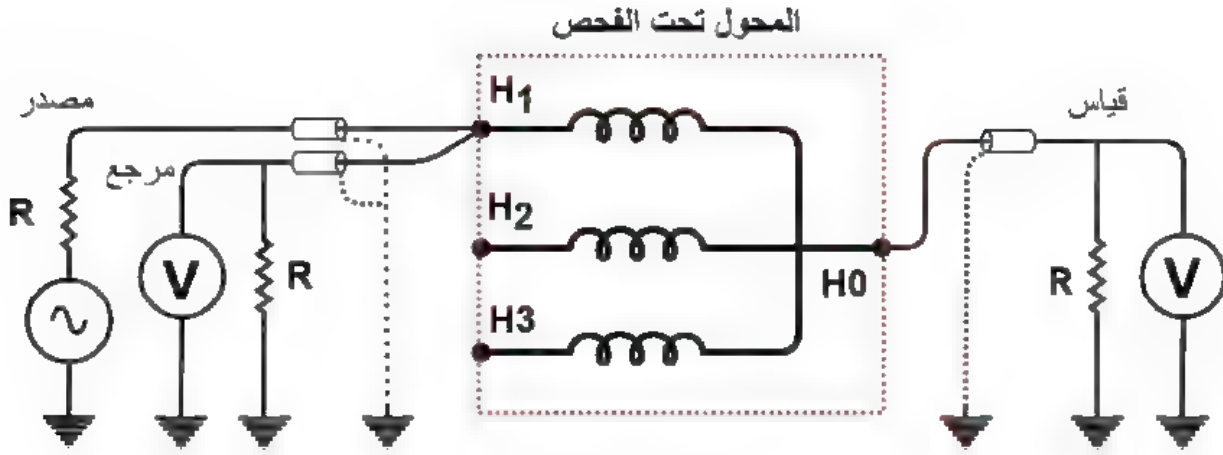
3. فلسفة الفحص

يتم تصميم المحولات بحيث تكون قادرة على تحمل الإجهاد الميكانيكي المؤثر عليها أثناء نقلها أو أثناء عملها في الظروف الطبيعية أو غير الطبيعية كالأعطال أو الحالات العابرة (Transients)، ولكن قد يزيد هذا الإجهاد عن الحدود المسموح بها خاصة في حالات الأعطال ذات التيارات الكبيرة أو نتيجة لضعف المادة العازلة وتقدمها مما يؤدي لحدوث تشوّه وتلف للملفات أو القلب الحديدي، في هذه الحالة فإن المنظومة المكوّنة لهذا المحول والتي تتمثل بمجموعة من المقاومات والمحاثات والمواسعات (RLC) ستختلف وفق نمط معيّن تبعاً لنوع العطل، مما ينعكس على نتيجة هذا الفحص ويُدل على وجود هذا النوع من الأعطال حيث أن الإستجابة الترددية (Frequency Response - FR) تكون بدلالة (Function of) هذه المُركبات المكوّنة لمنظومة المحول (RLC)، لذلك فإنه يتم اللجوء لعمل هذا الفحص بالإضافة لمجموعة من الفحوصات الأخرى ذات الحساسية لهذا النوع من الأعطال كفحص مُفاعلة التسرّب (Leakage reactance) وفحص الفولتية المنخفضة النبضي أو الدفعي (Low voltage impulse test - LVI) وفحص تيار التهيج (Excitation current) وفحص الإستجابة الترددية للضياعات الشاردة (Frequency response of stray losses - FRSL) بالإضافة لفحص الموسعة (Capacitance)، الجدول (8-1) يُبين مقارنة بين هذه الفحوصات وفقاً لما ورد في الدراسة الصادرة عن المجلس الدولي للأنظمة الكهربائية الكبيرة [CIGRE Mechanical condition assessment of transformer windings using frequency response analysis (FRA) 342]

الجدول رقم (8-1)

الفحص	المزايا	العيوب
فحص تيار التهيج Excitation current test	- يحتاج جهاز فحص بسيط نسبياً - يمكنه كشف أعطال القلب الحديدي للمحول	- غير حساس لتشوه الملفات. - نتيجة الفحص تتأثر بقوة بالمعناطيسية المتبقية.
فحص مُفاعلة التسرب Leakage reactance test	- يمكن الفحص بالطريقة التقليدية المواضحة في معايير فحص دائرة القصر - القيمة المرجعية للفحص موجودة على لوحة بيانات المحول لغايات المقارنة.	- تغيّر بسيط في قيمة مُفاعلة التسرب قد يكون سببه عطل كبير. - غير حساس لجميع أنماط تشوه الملفات (جيد في كشف تشوه الملفات الشعاعي/القطري Radial)
فحص تحليل الإستجابة الترددية لضغوطات الشاردة Freq. response of stray losses test - FRSI	- أكثر حساسية من فحص مُفاعلة التسرب. - يكاد يكون الوحيد القادر على كشف دائرة القصر بين الموصلات المتوازية في ملفات المحول.	- لا يُستخدم بشكل قياسي في المنشآت الصناعية.
فحص مواسعة الملفات Winding capacitance test	- قد يكون أكثر حساسية من فحص مُفاعلة التسرب. - جهاز الفحص القياسي متوفر.	- غير حساس لجميع أنماط تشوه الملفات (جيد في كشف تشوه الملفات الشعاعي/القطري Radial). - قد لا يمكن قياس المواسعة المطلوب خاصة عند فحص المحولات التلقائية (Autotransformers) - تغيّر بسيط في قيمة المواسعة قد يكون سببه عطل كبير - نتيجة الفحص تتأثر بدرجة الحرارة.
فحص الفولتية المنخفضة النبضي أو الدفعي Low voltage impulse test - LVI	معترف بحساسيته الكبيرة في الكشف عن تشوه الملفات.	يحتاج جهاز فحص متخصص. - صعوبة تحليل نتائجه. - صعوبة تكرار الفحص بنفس الحساسية.
فحص تحليل الإستجابة الترددية الفسحي Sweep frequency response analysis test - FRA	يمكن تكرار الفحص بنفس الحساسية بشكل أفضل من فحص (LVI) - يمكن تحليل نتائجه بشكل أسهل من فحص (LVI). عدد مستخدمين متزايد	يلزمه كُتيب إرشادي لتحليل نتائجه.

بالرجوع لفلسفة الفحص فإنه في هذا الفحص يتم تطبيق موجة فولتية بالنسبة لحزان المحول (المؤرض) على أحد أطراف ملفات المحول بحيث تكون هذه الموجة جيبيية ذات مقدار صغير قرابة (10Vp-p) ومتغيرة التردد (20Hz - 2MHz) حسب معايير اللجنة الكهروتقنية الدولية [IEC, 60076-18 2012]، و من ثم يتم قياس هذه الفولتية المُطبقة لتكون بمثابة موجة مرجعية (Reference) وقياس فولتية المخرج لتكون موجة إستجابة (Response) كما يظهر في الشكل (8-3) الذي يوضح دائرة فحص محول بواسطة كوابل محورية (Coaxial cables).

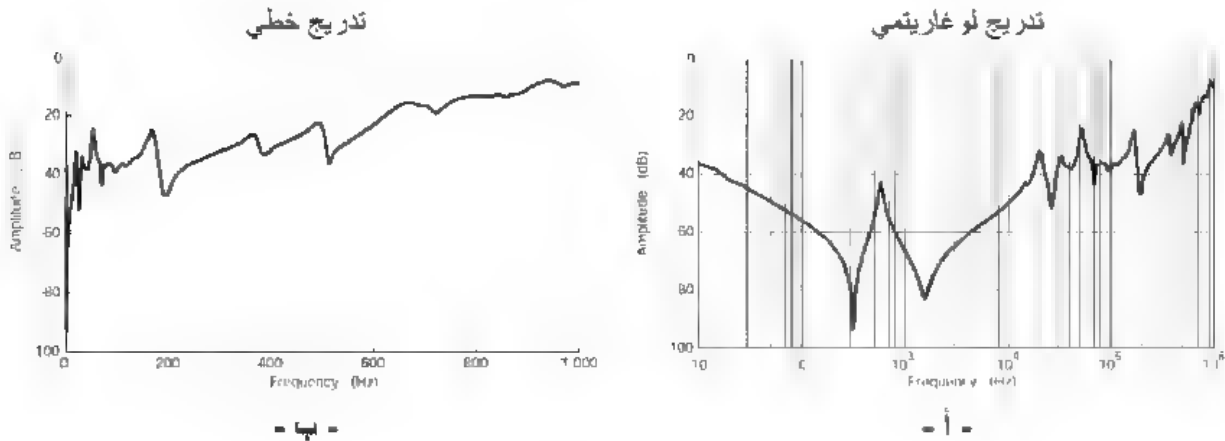


الشكل رقم (8-3)

بعد ذلك يتم إحتساب نسبة السعة (Amplitude ratio) لموجتي الفولتية ($\frac{V_{out}}{V_{in}}$) وبما أن هذه النسبة تتغير على نطاق واسع من القيم فإنه يتم إحتساب قيمة إستجابة الفولتية النسبية بال(dB) بواسطة المعادلة (8.1) التالية:

$$Relative\ Voltage\ Response = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right) \quad (8.1)$$

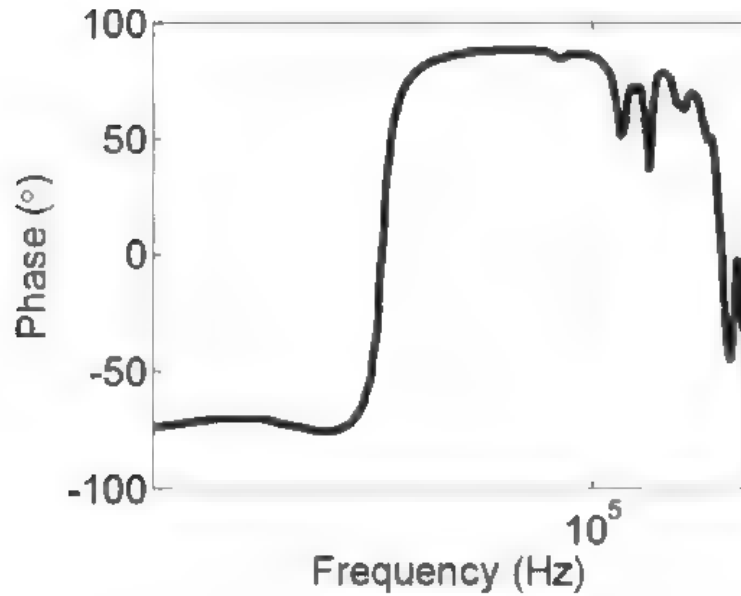
ومن ثم يتم رسم قيم إستجابة الفولتية النسبية بال(dB) بدلالة التردد (Frequency). بحيث يُمكن رسم هذه القيم بواسطة تدرج تردد لوغاريتمي (Logarithmic Scale) كما يظهر في الشكل (8-4) (أ) وهو الأكثر إستخداماً، أو بواسطة تدرج تردد خطي (Linear scale) كما يظهر في الشكل (8-4) (ب) الواردة في المعيار الصادر عن اللجنة الكهروتقنية الدولية [IEC, 60076-18 20012].



الشكل رقم (8-4)

كما ويُمكن أيضاً إيجاد فرق الطور بين موجتي الفولتية للمدخل والمخرج (Phase difference) بحيث يتم إحتساب قيمة الفرق في الطور بالدرجة (°) بواسطة المعادلة (8.2)، ومن ثم يتم رسمها بدلالة التردد كما يظهر في الشكل (8-5).

$$\text{Phase Difference} = \tan^{-1} \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right) \quad (8.2)$$



الشكل رقم (8-5)

- كيف يدل هذا الفحص على وجود تشوّه أو إزاحة في الملفات بالإضافة إلى اعطال القلب الحديدي للمحول كفقدان التآريض مثلاً:

مما سبق يُمكن ملاحظة أنه في حال حدوث عطل ميكانيكي للملفات والقلب الحديدي فإن ذلك سيؤثر على قيم المركبات المُكوّنة للمحول (RLC) والمُبيّنة بالشكل (8-1) الذي يوضح الدائرة المُكافئة المُبسّطة للمحول (Cascaded π sections)، وكما هو معلوم أن أي إختلاف في قيمة هذه العناصر (RLC) من شأنه التأثير على نتيجة هذا الفحص و هذا بدوره يُفسّر الإعتماد على هذا الفحص في الكشف عن تشوّه الملفات والقلب الحديدي للمحول.

ولزيادة الفهم سنقوم بعرض حالات لأعطال تمت محاكاتها لمجموعة من المحولات وتتبع الإختلاف الذي يطرأ على نتيجة فحص تحليل الإستجابة الترددية المُسحي (SFRA) كما ورد في النشرة العلمية [IEEE, Transformer diagnostic testing by frequency response analysis]

- الحالة الأولى:

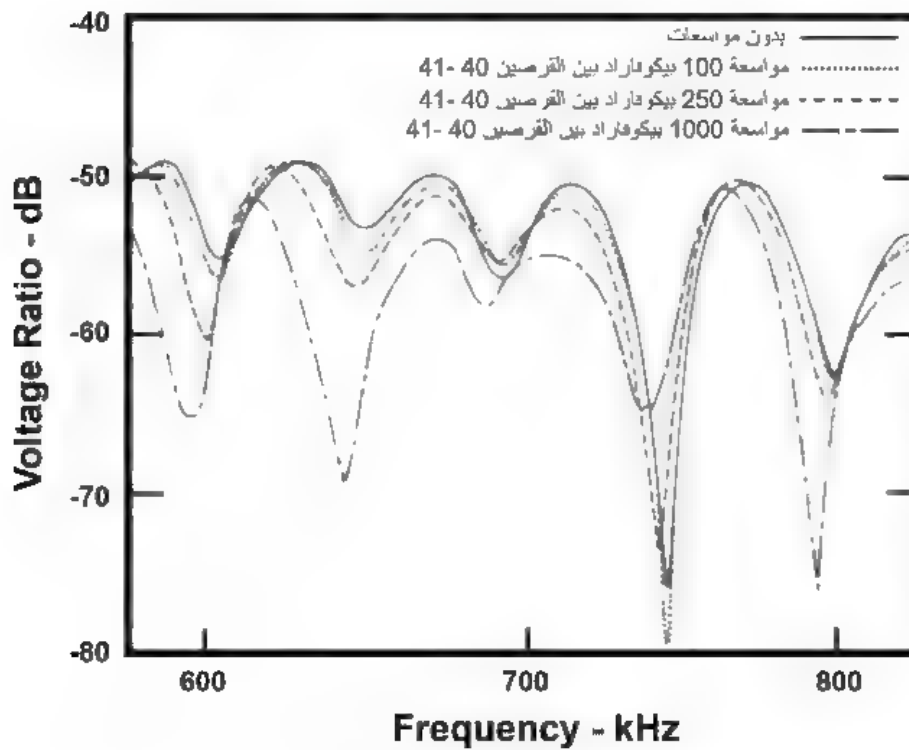
إختلاف المواسعة بين أقراص ملفات المحول (C_d - Disc to Disc capacitance) أو ما يُسمى بالـ (Inter-disc capacitance) والذي قد يكون ناتج عن قوى ميكانيكية أدت لإختلاف المسافة بين هاذين الملفين مما أثر على قيمة المواسعة بينهما. ولمحاكاة هذا النوع من الأعطال تم إضافة مواسعات بقيم مختلفة (100, 250, and 1000 pF) بيكوفاراد بين قُرصين من ملفات محول ذو سعة (8 MVA) ميجا فولت أمبير كما هو مُبين بالشكل (8-6) الوارد في المصدر [79].

مواسعة
Capacitor



الشكل رقم (8-6)

الشكل (8-7) الوارد في المصدر [79] يُبين الاختلاف في نتيجة هذا الفحص وفقاً لقيمة المواسعة المُضافة على ملفات المحول.

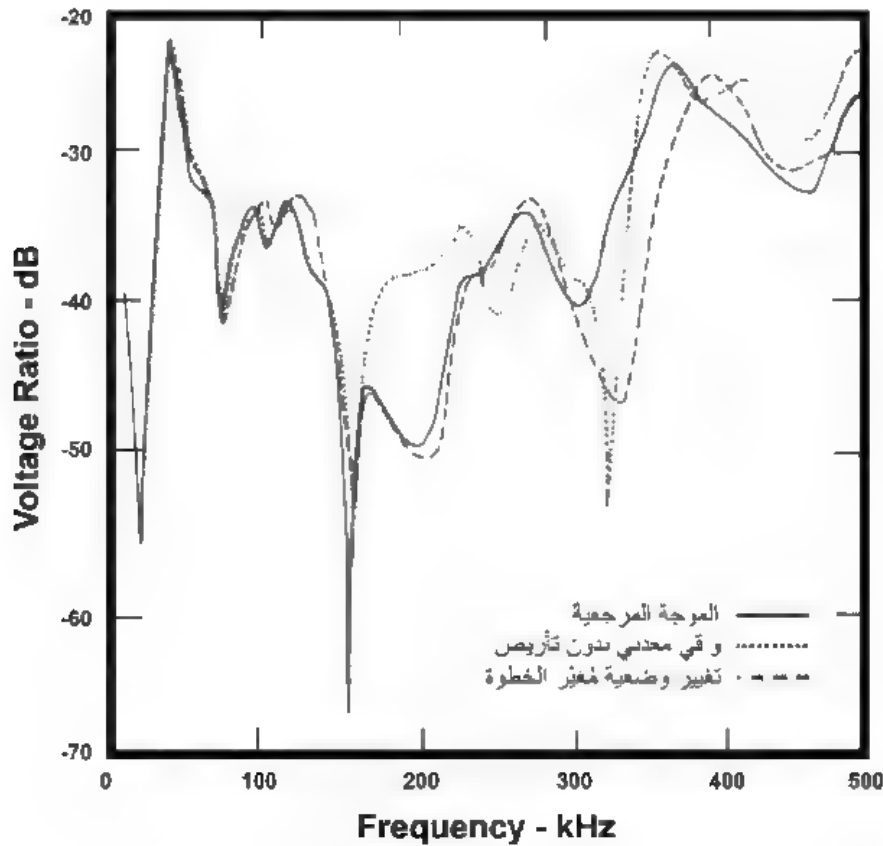


الشكل رقم (8-7)

• الحالة الثانية:

إختلاف المواسعة بين ملفات المحول والقلب أو الأرضي (C_g - Winding to ground capacitance) أو ما يُسمى بالـ (Inter-winding capacitance) والذي قد يكون ناتج عن فقدان تأريض القلب أو فقدان تأريض الواقي المعدني (Metallic Shield) الموجود بين ملفات العولتية المرتفعة والمنخفضة للمحول، ولمحاكاة هذا النوع من الإعطال تم إزالة التأريض الخاص بالـ (Metallic Shield) لمحول بالمواصفات

التالية (GSUT, 550MVA, 230/22 kV, Y/Δ) وإجراء فحص (SFRA) وكانت النتيجة كما هو مبين بالشكل (8-8) الوارد في المصدر [79]، بحيث يُمكن ملاحظة تأثير إختلاف المواسعة (C_g) عند الترددات الأكبر من (200 kHz) كيلوهيرتز.



الشكل رقم (8-8)

• الحالة الثالثة:

إختلاف المحاثّة الخاصة بالملفات (L_s - Winding inductance) والذي قد يكون ناتج عن اعطال أو عن تغيير وضعيّة مُغَيّر الخطوة (Tap Changer)، ولمحاكاة تأثير تعيّر محاثّة الملفات على نتيجة فحص (SFRA) تم تغيير وضعيّة مُغَيّر الخطوة (Tap changer) على طور واحد لمحول ذو سعة (550 MVA) ميجا فولت أمبير وإجراء فحص (SFRA) وكانت النتيجة كما هو مبين بالشكل (8-8)، بحيث يُمكن ملاحظة تأثير إختلاف محاثّة الملفات (L_s) الناتج عن تغيير وضعيّة مُغَيّر الخطوة (Tap changer) عند الترددات الأكبر من (200 kHz) كيلوهيرتز.

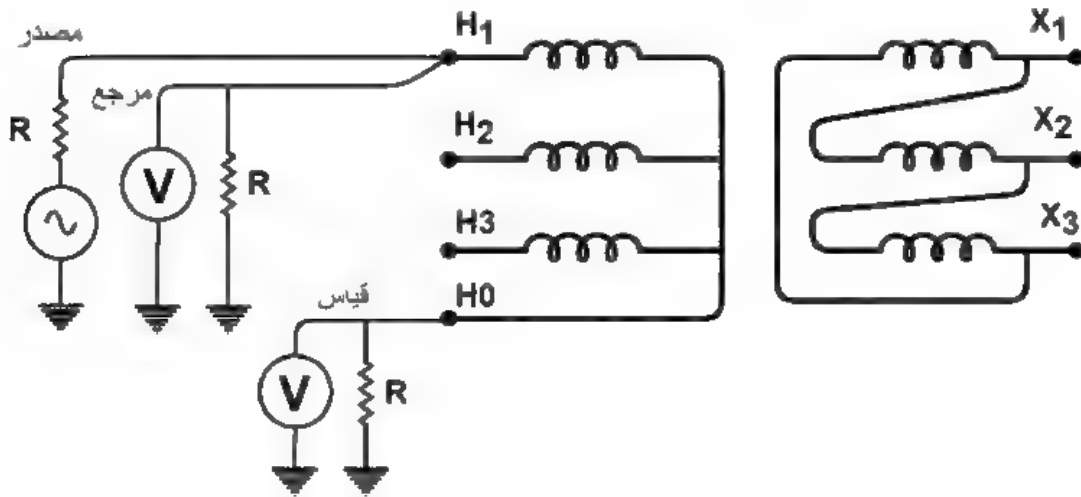
مما سبق يُمكن ملاحظة حساسية هذا الفحص في الكشف عن الأعطال التي قد تصيب الملفات أو القلب الحديدي للمحول والتي تؤدي لتغيير البنية الداخلية للمحول وما ينتج عنها من تغيير لمنظومة العناصر المُكوّنة للمحول.

4. أساليب الفحص

هنالك عدة توصيلات بين جهاز الفحص والمحول المُراد فحصه يُمكن من خلالها إجراء هذا الفحص وذلك وفقاً للأسلوب المُتبع، حيث وبالرجوع للمعايير العالمية الصادرة عن أشهر المنظمات كالمجلس الدولي للأنظمة الكهربائية الكبيرة (GIGRE) واللجنة الكهروتقنية الدولية (IEC) ومعهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE) فإنه تم اعتماد أربعة أساليب رئيسية لإجراء هذا الفحص كالآتي:

4.1 الأسلوب الأول: End to End Open Circuit

يُعد إجراء الفحص بهذا الأسلوب الأكثر شيوعاً والموصى به حسب معايير اللجنة الكهروتقنية الدولية [IEC, 60076-18 2012] بحيث يُمكن تطبيق هذا الأسلوب على ملفات الفولتية المرتفعة (HV) أو المنخفضة (LV) للمحول سواء كانت موصولة على شكل مثلث (Delta - Δ) أو على شكل نجمة (Star - Y). وفي هذا الأسلوب يتم تطبيق موجة الفولتية (Input) على أحد أطراف الملف (على طور واحد) ويتم قياس الموجة (Output) على الطرف الآخر للملف (على نفس الطور)، كما وتُحذّر الإشارة أنه في حال كانت الملفات موصولة على شكل نجمة (Star - Y) فإنه يُمكن تطبيق الفولتية على أحد الأطراف الأربعة (H1 or H2 or H3) والقياس عن طريق طرف نقطة التعادل (H0) والعكس صحيح أيضاً حيث أنهما سيعطيان نفس النتيجة ولكن يجب ذكر أطراف الحقن والقياس في معلومات الفحص كما ويُتصح باستخدام نفس توصيلة الفحوصات السابقة.

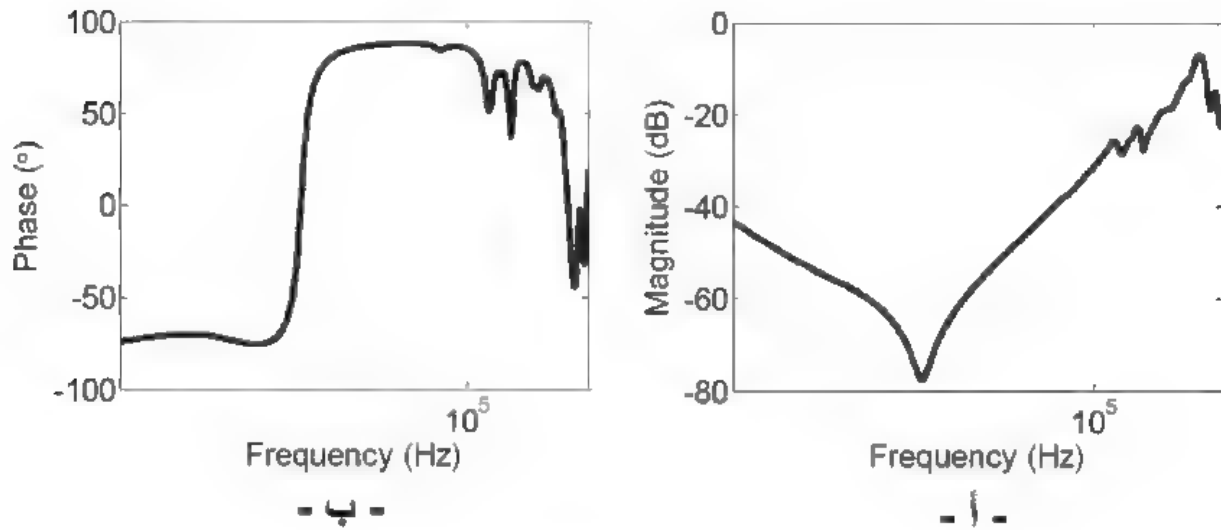


الشكل رقم (8-9)

إن مصطلح الدائرة المفتوحة (Open circuit) الوارد في إسم هذا الأسلوب يشير إلى ترك أطراف الملفات المحول الثانوية مفتوحة، فمثلاً لو تم إجراء هذا الفحص على أحد أطراف ملفات الفولتية المرتفعة للمحول فيجب ترك أطراف ملفات الفولتية المنخفضة مفتوحة (Open circuit) أو (Floating) وكذلك الحال لأطراف باقي أطوار ملفات الفولتية المرتفعة التي لا يتم تطبيق الفحص عليها كالأطراف (H2 و H1) في الشكل (8-9) السابق، وهذا بدوره يُصعب شبه بين توصيلة الفحص بهذا الأسلوب وتوصيلة فحص تيار التهيج (Excitation current test) ويُفسّر هيمنة القلب الحديدي على نتيجة الفحص خاصة عند الترددات المنخفضة كما سيتم شرحه لاحقاً.

الشكل [(8-10) (أ)] يُبين مثال على نتيجة فحص نموذجية (Typical) بهذا الأسلوب (Open circuit) حيث يُشير الجزء الأول من الرسم عند الترددات المنخفضة (أقل من 20 كيلوهرتز تقريباً) إلى حدوث ظاهرة الرنين العكسي (Antiresonance) والماتجة عن تأثير محاث القلب الحديدي المغناطيسية مُضافاً إليها محاث التسرب لذلك نرى إنخفاضات في رسم السعة (Amplitude) عند هذه الترددات، بعد ذلك تبدأ الرسم بالارتفاع نتيجة لتأثير مواسعة الملفات.

وكذلك يُمكن الملاحظة من الشكل [(8-10) (ب)] الخاص بفرق الطور (Phase) إنتقال الدرجة من -90° إلى $+90^\circ$ وذلك لنفس السبب المذكور أعلاه وهو تأثير المحاث المغناطيسية للقلب بالبداية ثم بعد ذلك يبدأ تأثير مواسعة الملفات.

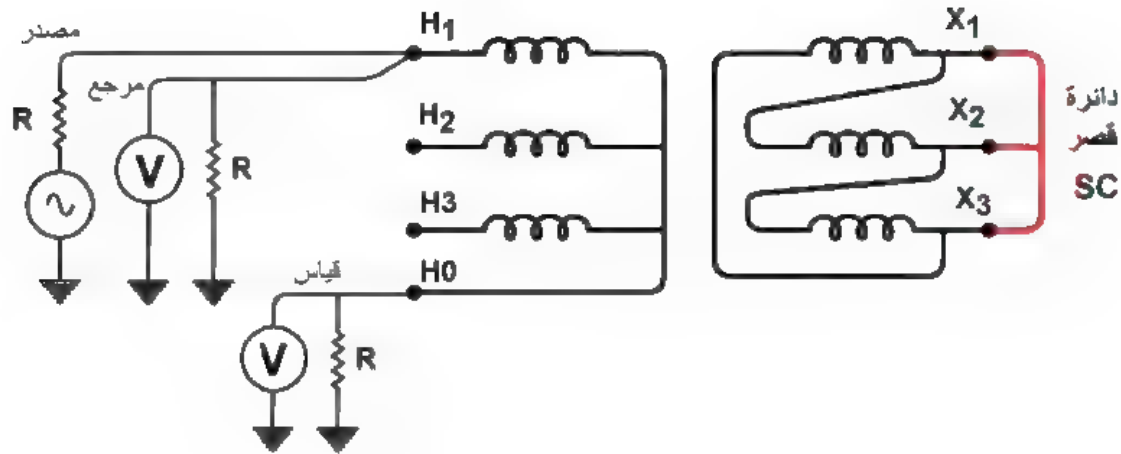


الشكل رقم (8-10)

وبما أن الفحص بهذا الأسلوب يتم على طوار واحد فقط من أطوار المحول، فإنه يستلزم إجراء ستة فحوصات لتغطية كامل ملفات المحول للمحولات ثلاثية الطور ثنائية الملفات على سبيل المثال وتسعة فحوصات للمحولات ثلاثية الطور ثلاثية الملفات.

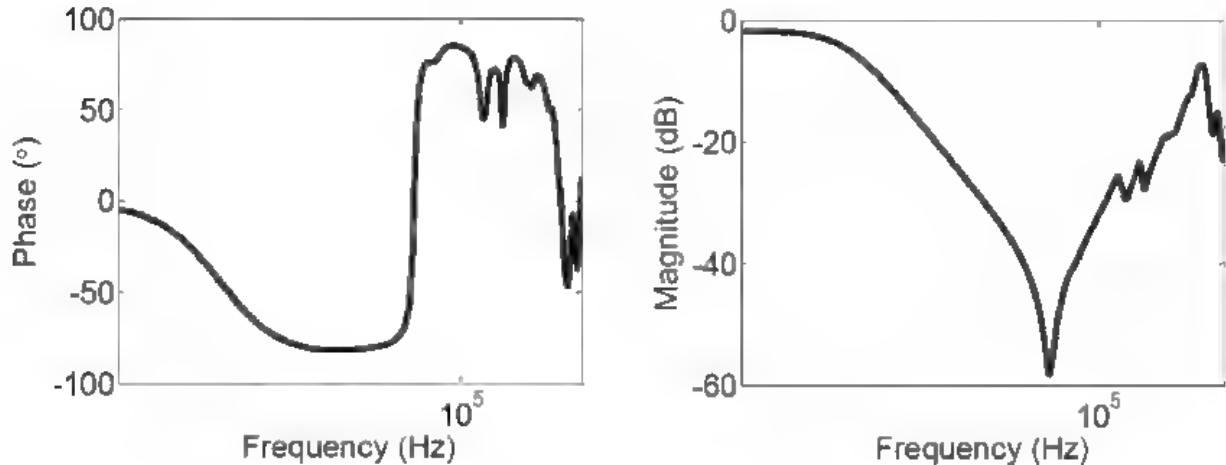
4.2 الأسلوب الثاني: End to End Short Circuit

الفحص بهذا الأسلوب مُشابه لما تم شرحه في الأسلوب السابق، ولكن يَكُن الاختلاف بينهما في وضعية أطراف ملفات المحول الثانوية حيث أنها كانت مفتوحة (Floating) في الأسلوب السابق أما في هذا الأسلوب فإنه يتم قَصْرُها (Short circuited) كما هو مُبين بالشكل (8-11)، ويُمكن أيضاً تأريضها بعد قصرها أو تركها مقصورة فقط دون تأريضها (Floating)، ومن التوصيلة يُمكن ملاحظة الشبه بينها وبين نظيرتها لفحص مُفاعلة التسرب (Leakage reactance test) أو فحص مُعاوقة القصر (Short circuit impedance test).



الشكل رقم (8-11)

الشكل (8-12) يُبين مثال على نتيجة فحص نموذجية (Typical) بهذا الأسلوب (Short circuit) حيث أن توصيلة الفحص بهذا الأسلوب كفيلة بإزالة تأثير المحاثّة المغناطيسية للقلب الحديدي والإبقاء فقط على تأثير محاثّة التسرب وهذا بدوره يُفسّر عدم إنخفاض رسمة السعة (Amplitude) في بدايتها كما كان الحال في نظيرتها للأسلوب السابق (Open circuit). كما ويُمكن الإستفادة من هذا الأسلوب في حال أردنا التأكد من أن عطل المحول سببه القلب الحديدي أم جزء آخر، حيث أنه بواسطة هذا الأسلوب يُمكن تحديد تأثير هذا القلب الحديدي للترددات المنخفضة (أقل من 20 كيلوهرتز تقريباً)، وكذلك في حال أردنا تجنب تأثير مغناطيسية القلب المُتبقيّة على نتيجة الفحص.

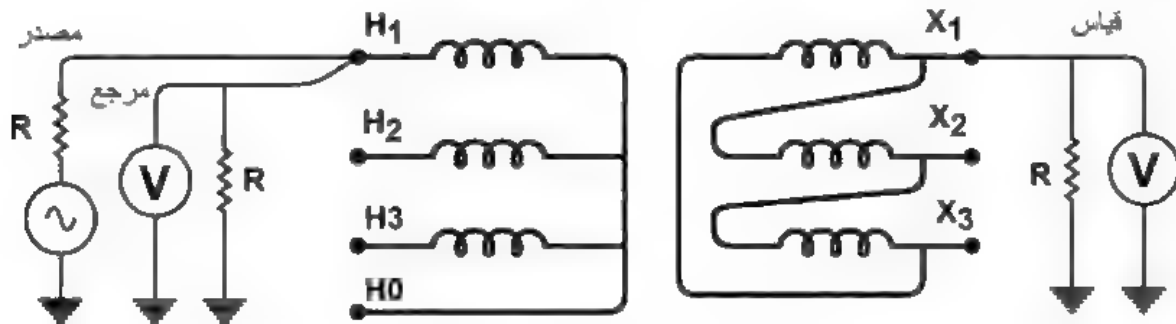


الشكل رقم (8-12)

4.3 الأسلوب الثالث: Capacitive inter-winding

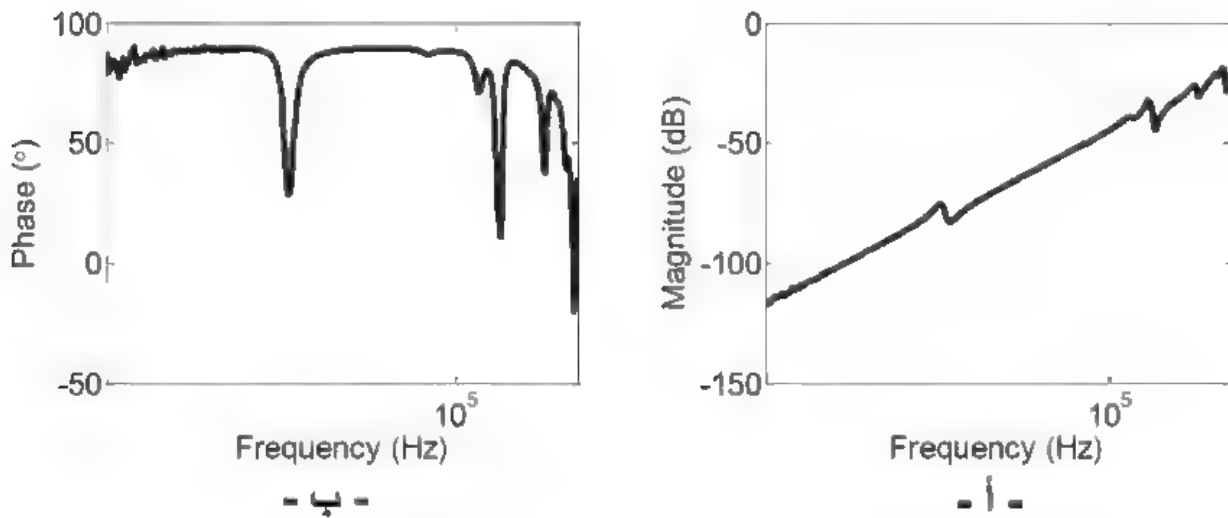
يُمكن تطبيق هذا الأسلوب على ملفات الفولتية المرتفعة (HV) أو المنخفضة (LV) للمحول سواء كانت موصولة على شكل مثلث (Delta - Δ) أو على شكل نجمة (Star - Y) مع عدم إمكانية تطبيقه على المحولات التلقائية (Autotransformers)، بحيث يتم تطبيق موجة الفولتية (Input) على أحد أطراف طور من أطوار الملف الابتدائي ويتم قياس الموجة (Output) على أحد أطراف نفس الطور من الملفات

الثانوية مع الإبقاء على جميع أطراف الملفات المتبقية مفتوحة (Open circuit) أو (Floating) كما هو مُبين في الشكل (8-13).



الشكل رقم (8-13)

في هذا الأسلوب تتأثر نتيجة الفحص بالمواسعة بين الملفات (Inter-winding capacitance) بحيث يُمكن الملاحظة في الشكل (8-14) والذي يُمثل نتيجة فحص نموذجية (Typical) أن قيمة الإستجابة (response) أو كما تُسمى رسمة السعة (Amplitude) تكون منخفضة بالبداية نتيجة لقيمة المعاوقة المرتفعة (High Impedance) والتي تكون بغالبيتها سعوية (Capacitive)، فكما يظهر الشكل (8-14) (أ) يُمكن ملاحظة الإرتفاع في رسمة السعة (Amplitude) مع التردد وكذلك غالبية رسمة الطور (Phase) الطاهرة في الشكل (8-14) (ب) ذات قيمة موجبة (Positive) مع إختلاف التردد وهذا يؤكد أن المعاوقة المسيطرة على نتيجة الفحص غالبيتها سعوية (Capacitive).

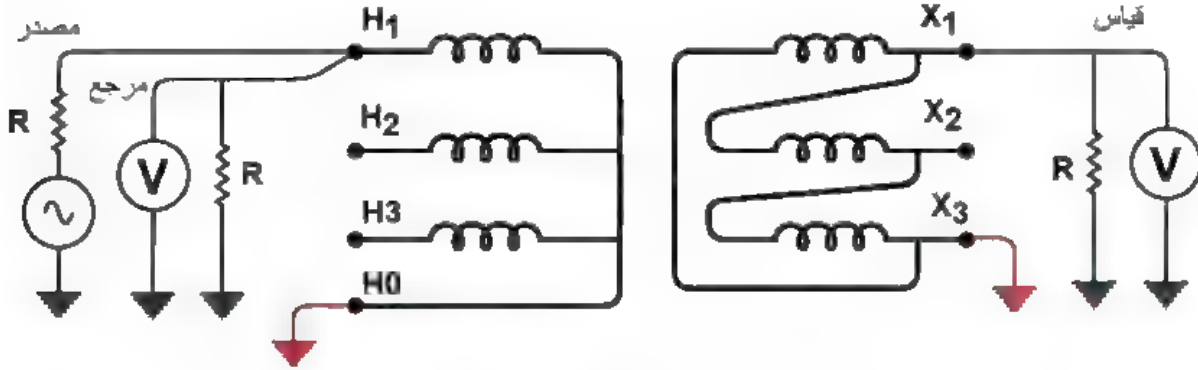


الشكل رقم (8-14)

وبما أن القيمة المُسيطرة على نتيجة الفحص هي المواسعة بين الملفات (Inter-winding capacitance) فإن هذا الفحص ذو حساسية مرتفعة في الكشف عن وجود تشوّه شعاعي/فُطري للملفات (Winding radial deformation)، ولكن يبقى هذا الأسلوب غير مُفضل لصعوبة تحليل نتائجه.

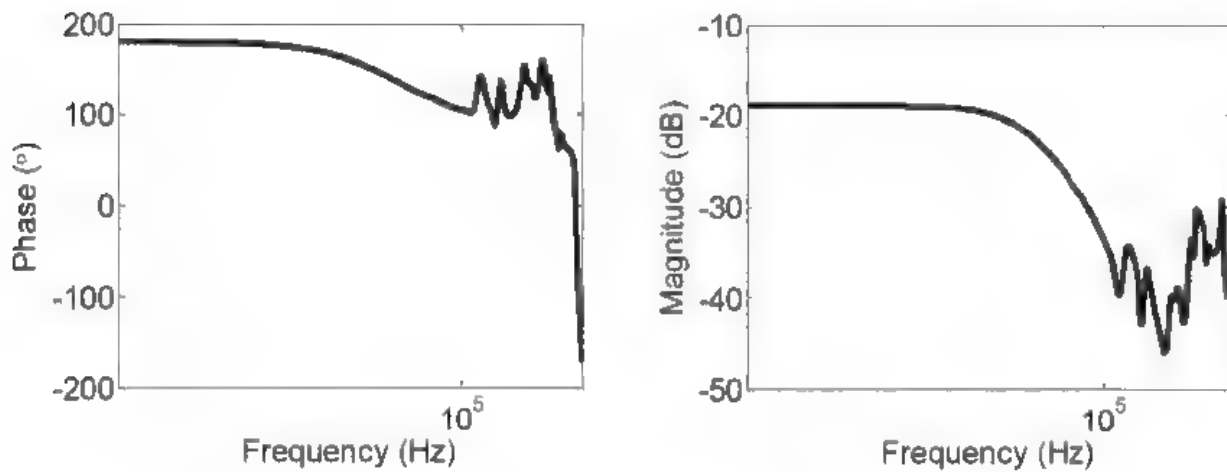
4.4 الأسلوب الرابع: Inductive inter-winding

في هذا الأسلوب يتم تطبيق موجة الفولتية (Input) على أحد أطراف طور من أطوار الملف الابتدائي مع مراعاة تأريض طرفه الآخر ويتم قياس الموجة (output) على أحد أطراف نفس الطور من الملفات الثانوية مع مراعاة تأريض طرف الطور الآخر والإبقاء على جميع أطراف الملفات المُتبقية مفتوحة (Open circuit) أو (Floating) كما هو مُبين في الشكل (8-15).



الشكل رقم (8-15)

ويهدف الفحص بهذا الأسلوب لقياس نسبة الفولتية للمحول (Transformer voltage ratio) ويُمكن ملاحظة توصيلة الفحص الشبيهة بتوصيلة فحص نسبة الفولتية أحادي الطور (Per phase TVR). فكما يظهر في الشكل (8-16) والذي يُمثل نتيجة فحص نموذجية (Typical) أن قيمة الإستجابة (response) أو رسمة السعة (Amplitude) عند الترددات المنخفضة تُعبر عن نسبة الفولتية (Voltage ratio) بين الملفات المفحوصة، أما للترددات المرتفعة فيُمكن إهمالها كونها لا تُعثر عن أية نتائج مفيدة.



الشكل رقم (8-16)

عند إجراء هذا الفحص على المحولات ثلاثية الطور ثنائية الملفات (Three phase two winding) فإنه يُمكن إجراء 15 فحص كما هو مبين بالجدول (8-1) والذي يُبين الأطراف التي يجب تطبيق الفولتية عليها وأيضاً التي يجب القياس عليها للمحولات ذات مجموعة التوصيل التي تكون فيها ملفات الفولتية المنخفضة متأخرة عن ملفات الفولتية المرتفعة بمقدار (30°) مثل (Dyn1) وغيرها من التوصيلات، حيث

أن المعيار الصادر عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE, C57.149-2012] يُوصي بإجراء 9 فحوصات منها على الأقل كما هو مبين بالجدول التالي.

الجدول رقم (8-1)

Y - Δ LV lag HV by 30°	Δ - Y LV lag HV by 30°	رقم الفحص	أسلوب الفحص
H1 - H0	H1 - H3	1	End to End OC (HV Side) باقي الأطراف غير المذكورة تبقى مفتوحة
H2 - H0	H2 - H1	2	
H3 - H0	H3 - H2	3	
X1 - X2	X1 - X0	4	End to End OC (LV Side) باقي الأطراف غير المذكورة تبقى مفتوحة
X2 - X3	X2 - X0	5	
X3 - X1	X3 - X0	6	
H1 - H0	H1 - H3	7	End to End SC (HV Side) أطراف ملفات العولتية المنخفضة يجب قصرها
H2 - H0	H2 - H1	8	
H3 - H0	H3 - H2	9	
H1 - X1	H1 - X1	10	Capacitive inter-winding باقي الأطراف غير المذكورة تبقى مفتوحة
H2 - X2	H2 - X2	11	
H3 - X3	H3 - X3	12	
H1 - X1	H1 - X1	13	Capacitive inter-winding تأريض أطراف الأطوار تحت الفحص وباقي الأطراف تبقى مفتوحة
H2 - X2	H2 - X2	14	
H3 - X3	H3 - X3	15	

ملحوظة (8-2): عادةً لتحديد نوع وعدد الفحوصات التي يجب إجراؤها للمحول، يُمكن الإعتماد على الفحص المرجعي الذي ستم المقارنة به وإجراء نفس الفحوصات لغايات المقارنة.



أما فيما يخص المحولات ثلاثية الطور ثلاثية الملفات (Three phase tertiary winding) وباقي مجموعات التوصيل للمحولات ثلاثية الطور ثنائية الملفات يُمكن إيجاد الملحق (8-3) والذي يضم جدول بالفحوصات التي يُمكن إجراؤها لهذا النوع من المحولات وما يُنصح بإجرائه على الأقل وفقاً لمعهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE).

5. خطوات الفحص

بعد التعرف على فلسفة الفحص وأساليبه وتوصيلاته يُمكن البدء بخطوات الفحص كالآتي:

5.1 عزل المحول كهربائياً (**Transformer De-energization**) مع مراعاة تطبيق نظام (إقفال مصادر

الطاقة ووضع لافتات عليها) أو ما يُسمى بنظام التقافل (**Lock-out Tag-out LOTO**).

5.2 عزل نظام مكافحة الحريق بالماء (أو كما يُسمى نظام ترديد خزان المحول ومنع إنتشار الحريق) الخاص

بالمحول المُراد فحصه خشية عمل النظام بشكل خاطئ أثناء إجراء الفحص مما قد يؤدي لمخاطر القوس الكهربائي وما ينطوي عليه من مخاطر على الأشخاص أو المحول خاصة أثناء تطبيق الفولتية على المحول أو قد يؤدي الماء لتلف جهاز الفحص نفسه.

5.3 تطبيق كافة إجراءات السلامة الخاصة بإجراء الفحوصات الكهربائية المُضمنة في معايير معهد

مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (**IEEE Recommended Practices for Safety in High-**

Voltage and High-Power Testing) والمعهد الوطني الأمريكي للمعايير (**ANSI National**

Electrical Safety Code) ومُنظمة إدارة السلامة والصحة المهنية (**OSHA Specifications for**

Accident Prevention Signs and Tags).

5.4 فتح أطراف الفولتية المنخفضة (**LV side terminals**) والفولتية المرتفعة (**HV side terminals**)

وذلك بإزالة الموصلات عنها (**Removing HV&LV Cables or Busbars**) وكذلك الحال بنقطة

التعادل للمحول (**Neutral point**) إن وجدت. وتعود السبب وراء ذلك لتجنب تأثير المواسعة الناتجة عن القضبان (**Busbars**) و الموصلات (**Cables**) على نتيجة هذا الفحص.

5.5 تفريغ الشحنات المُخزنة بملفات المحول (**Trapped Charges**) قبل توصيل كوابل الفحص وذلك

بعمل دائرة قصر للملفات (**Short circuit**) وتأريضها لمدة من الزمن وكذلك الحال بعد الإنتهاء من

الفحص وقبل إزالة كوابل الفحص. بالإضافة إلى التأكد من تأريض خزان المحول أثناء إجراء الفحص والإبقاء على تأريض القلب الحديدي (**Iron core**) ودعائم تثبيت القلب (**Core clamp**).

تحذير: يكون تأريض كوابل الفولتية المرتفعة إما عبر مُستعزلات التأريض الثابتة

(**Earthing Dis-connector**) أو المتنقلة (**Portable**) قبل البدء بفك هذه الكوابل

عن عوازل إحتراق المحولات (**Bushings**)، وذلك لما قد تحويه من فولتية حثية

(**Induction voltage**) ناتجة عن المُعدات أو الخطوط الهوائية (**Overhead Lines**

OHL -) المجاورة للمحول المُراد فحصه والمشحونة بفولتيات مرتفعة.



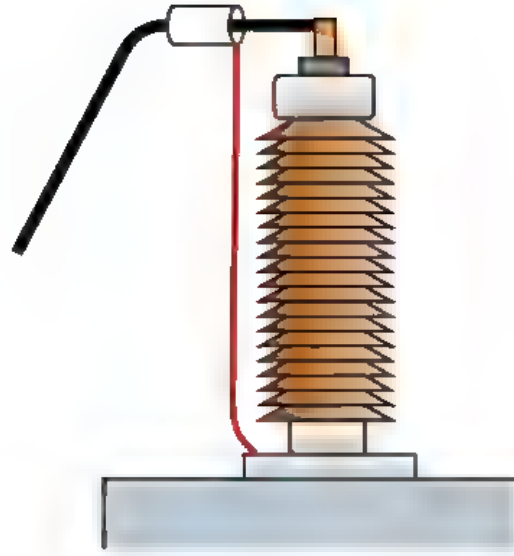
ملحوظة (3-8): يجب التأكد من إستقامة كوابل التأريض الخاصة بغلاف (**Sheath**)

كوابل الفحص المحورية (**Coaxial**) كما هو مُبين بالشكل (8-17)، وأن تكون أقصر ما

يُمكن مع مراعاة عدم لفها على شكل محائة حتى لا تؤثر على نتيجة الفحص، وكذلك

يُنصح بأن تكون من النوع (**Flat braid**).





الشكل رقم (8-17)

ملحوظة (8-4): يجب مراعاة أن تكون كوابل المحص المحورية (Coaxial cables) نفس الطول وأن لا يزيد طولها عن (30m) متر وفقاً لمعهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE).



5.6 في حال سبق إجراء هذا الفحص إجراء أي من الفحوصات التي تعتمد على الفولتية الثابتة (DC) مثل فحص مقاومة العازل (Insulation resistance) أو فحص مقاومة الملفات (Winding resistance)، يُنصح بإزالة المغناطيسية المُتبقة (De-magnetization) بالطُرق الواردة في نهاية الفحصين سابقين الذكر (الفصل الثاني و الثالث)، وذلك لأن نتيجة هذا الفحص تتأثر بقيمة المغناطيسية المُتبقة وتشبع القلب الحديدي للمحول.

5.7 تسجيل درجة حرارة المحول، عادةً ما يتم اعتماد درجة حرارة الزيت العلوي (Top oil temperature).

5.8 التأكد من وضعية مُغَيِّر الخطوة (Tap changer) بحيث تكون عند الخطوة (Tap) التي تكون فيها كامل الملفات بالخدمة وعادةً ما تكون الخطوة رقم واحد (Tap #1)، بالإضافة إلى إمكانية إجراء هذا الفحص عند الخطوة (Tap) التي تكون فيها جميع ملفات مُغَيِّر الخطوة (Tap changer) خارج الخدمة حسب معايير اللجنة الكهروتقنية الدولية [IEC, 60076-18 2012] وهذا لمُغَيِّرات الخطوة من النوع (OLTC)، أما فيما يخص مُغَيِّرات الخطوة من النوع (DETC or OCTC) يُمكن إجراء الفحص عند الخطوة التي كان عليها المحول أثناء عمله الطبيعي أي كما وُجد.

5.9 بالرجوع لمعايير اللجنة الكهروتقنية الدولية [IEC, 60076-18 2012]، يُنصح قبل بدء الفحص بإجراء بعض التفقدات لجهاز الفحص إذا لزم الأمر وذلك للتأكد من موثوقيته ومن هذه التفقدات الآتي:

- (Zero-check measurement)
- (Repeatability Check)
- (Instrument performance check)

5.10 تحديد تردد الفحص:

بالرجوع لمعايير اللجنة الكهروتقنية الدولية [IEC, 60076-18 2012] فإن أقل قيمة تردد قياس يجب أن تكون (20 Hz) هيرتز أو أقل، و أقل قيمة تردد مرتفع للمحولات ذات الفولتية الأكبر من (72.5 kV) كيلوفولت يجب أن تكون (1 MHz) ميغا هيرتز، و أقل قيمة تردد مرتفع للمحولات ذات الفولتية الأقل أو تساوي (72.5 kV) كيلوفولت يجب أن تكون (2 MHz) ميغا هيرتز.

5.11 عمل التوصيلة الخاصة بهذا الفحص وفقاً لأسلوب الفحص المُراد إجراؤه وكما هو موضح في فقرة أساليب الفحص السابقة.

5.12 لباقي خطوات الفحص بواسطة أجهزة الفحص الحديثة يُمكن الرجوع للملحق (1-8) الخاص بجهاز الفحص (FRAX 99) المُصنَّع بواسطة شركة (MEGGER).

6. معلومات لا بُد من توافرها في تقرير الفحص

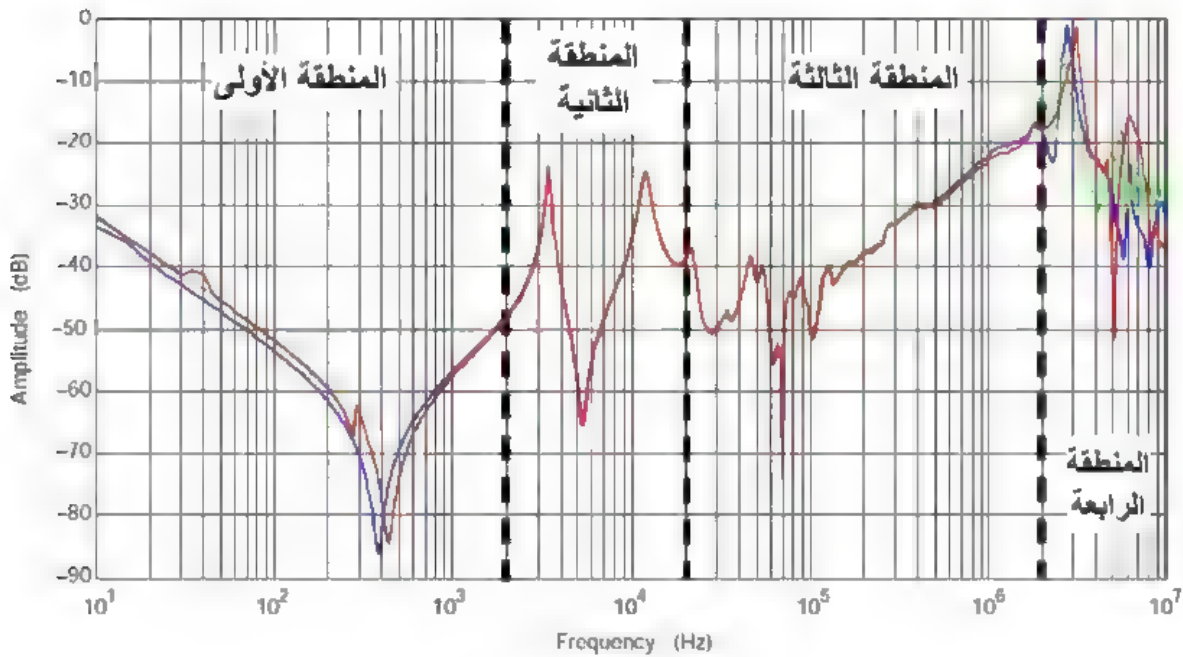
هناك مجموعة من المعلومات لا بُد من توافرها في تقرير الفحص وذلك لغايات مقارنة الفحص مستقبلاً ولتأمين المعلومات اللازمة عن توصيلة الفحص عند إعادته مرة أخرى، حيث سيتم ذكر المعلومات الواجب توافرها (required) مع التذكير بوجود الكثير من المعلومات ولكن هذه أهمها كما وردت في المعيار الصادر عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE, C57.149-2012]:

- ✓ مُصنَّع المحول Transformer manufacture
- ✓ رقم المحول التسلسلي – Transformer serial number
- ✓ البطاقة التعريفية للمحول – Transformer ID
- ✓ الشركة المالكة للمحول – Company
- ✓ موقعها – Location
- ✓ وضع زيت المحول (مفرغ أو مليء) Oil Status (immersed or not)
- ✓ طول القضبان الموصول بعوازل الإحتراق في حال تعدُّد فكها Length of busbars connected to the bushings
- ✓ تاريخ ووقت إجراء الفحص – Date and Time of measurements
- ✓ وضعية مُغيِّر الخطوة – Tap changer position
- ✓ نوع الفحص (دائرة مفتوحة أو مقصور أو حثي أو سعوي) – Measurements type
- ✓ فولتية الفحص - Applied test voltage
- ✓ الأطراف التي تم تطبيق الفولتية عليها والتي تم القياس عليها والتي تم تأريضها أو قصرها.

7. طبيعة نتائج الفحص

إن نتيجة هذا الفحص تكون على شكل مُخطط بياني يوضح تغيُّر نسبة الفولتية (**Volage ratio**) أو كما تُسمى بالسعة (**Amplitude**) بوحدة الـ (dB) مع التردد (**Frequency**) بالهيرتز وهي الأكثر شيوعاً، وكذلك يُمكن التعبير عن هذا الفحص بمُخطط بياني لتغيُّر فرق الطور (**Phase difference**) بالدرجة (°) مع التردد (**Frequency**) بالهيرتز.

لذلك وقبل البدء بتفاصيل تحليل نتائج الفحص لا بُد من فهم طبيعة نتيجة هذا الفحص، فبالرجوع إلى أشهر المعايير والمُشارت التقنية الصادرة عن كبرى المنظمات كمعهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (**IEEE**) والمجلس الدولي للأنظمة الكهربائية الكبيرة (**CIGRE**) واللجنة الكهروتقنية الدولية (**IEC**) فإن المُخطط الناتج عن هذا الفحص والخاص بنسبة الفولتية (**Voltage ratio**) أو السعة (**Amplitude**) يُمكن تقسيمه لأربعة مناطق وفقاً للتردد كما هو مُبين في الشكل (8-18) الواردة في المعيار **[IEC, 60076-18 2012]** بحيث تحتوي كل منطقة على مجموعة من الملامح التي تتأثر بجزء من أجزاء المحول كالقلب الحديدي و مُفاعلة الملفات الحثية وعلاقة الملفات فيما بينها وملفات مُغيّر الخطوة (**Tap changer**) والموصلات ونقاط التوصيل.



الشكل رقم (8-18)

7.1 المنطقة الأولى (منطقة الترددات المنخفضة)

تتأثر هذه المنطقة بشكل كبير بمحاثة القلب المغناطيسية (**Magnetizing inductance**) ومواسعة المحول الكُلتية، وتضم هذه المنطقة الترددات المنخفضة (الأقل من 2kHz) كيلوهرتز

7.2 المنطقة الثانية (منطقة الترددات المتوسطة)

تتأثر هذه المنطقة بشكل كبير بعلاقة الملفات مع بعضها البعض أو ما يُسمى بالـ (Winding interaction) والمقصود هنا توصيلة الملفات فيما إذا كان المحول أحادي/ثلاثي الطور أو أن الملفات موصولة على شكل مثلث (Δ - Delta) أو نجمة (Y - Star) أو إذا كان المحول من النوع التلقائي (Autotransformer)، وتضم هذه المنطقة الترددات المتوسطة ($2 \text{ kHz} - 20 \text{ kHz}$) كيلوهرتز.

للمحولات ثلاثية الطور ذات القلب الحديدي ثلاثي الأعمدة (Core type) فإن رسمة الطور الأوسط تحتوي على منطقة رنين عكسي (Antiresonance) واحدة مقارنة بالطورين الآخرين الذان يحتويان على منطقتي رنين عكسي، ويعود السبب في ذلك لتماثل مسارات المجال المغناطيسي داخل القلب (Symmetrical reluctance paths). كما وتُحذّر الإشارة إلى تأثير هذه المنطقة بمقدار المغناطيسية المُتبقية في القلب الحديدي (Core residual magnetization).

7.3 المنطقة الثالثة (منطقة الترددات المرتفعة)

تتأثر هذه المنطقة بشكل كبير ببنية الملفات (Winding structure) والتي تكون على شكل محاثّة تسرب (Leakage inductance) ومواسعات على التوالي (C_s) وعلى التوازي (C_g)، علماً بأن المواسعات على التوالي تُعد الأكثر تأثيراً على شكل رسمة الإستجابة لهذا الفحص، وتضم هذه المنطقة الترددات المرتفعة ($20 \text{ kHz} - 1 \text{ MHz}$).

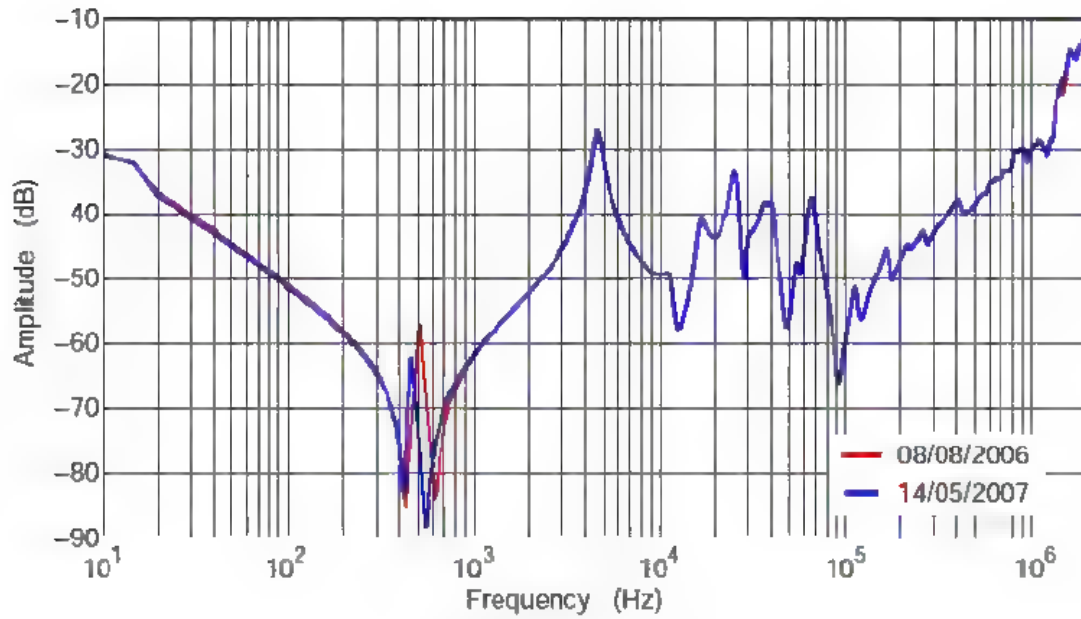
7.4 المنطقة الرابعة (منطقة الترددات بعد المرتفعة)

تتأثر هذه المنطقة بشكل كبير بتوصيلة الفحص خاصة توصيل الكوابل المحورية (Coaxial cables) المُستخدمة في الفحص بالأرض، وتضم هذه المنطقة الترددات الأكبر من (1 MHz) ميغاهيرتز للمحولات ذات الفولتية الأكبر من (72.5 kV) كيلوفولت والترددات الأكبر من (2 MHz) للمحولات ذات الفولتية الأقل من أو تساوي (72.5 kV) كيلوفولت.

8. تحليل نتائج الفحص

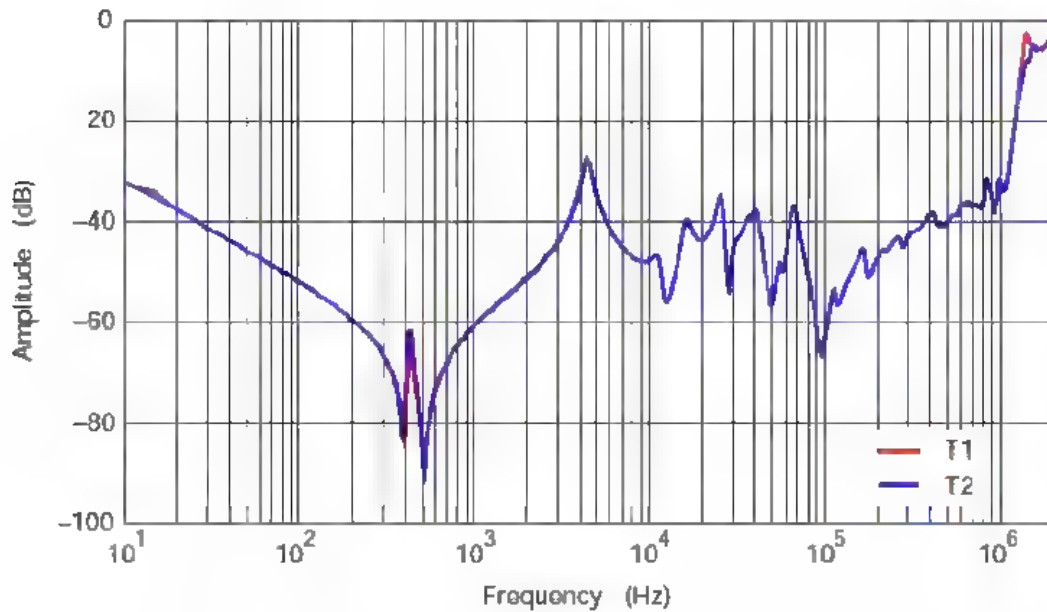
بالرجوع للمعايير الصادرة عن اللجنة الكهروتقنية الدولية [IEC, 60076-18 2012] يُمكن إيجاد الطرق الآتية لتحليل نتائج هذا الفحص:

8.1 الطريقة الأولى: مقارنة نتائج الفحص بنتائج فحوصات القبول المُصنعية (Factory Acceptance Test - FAT) أو الموقعية (Site Acceptance Test - SAT) أو غيرها من القيم المرجعية كنتائج الفحوصات الروتينية السابقة (Routine Test) لهذا المحول كما هو مُبين بالشكل (8-19).



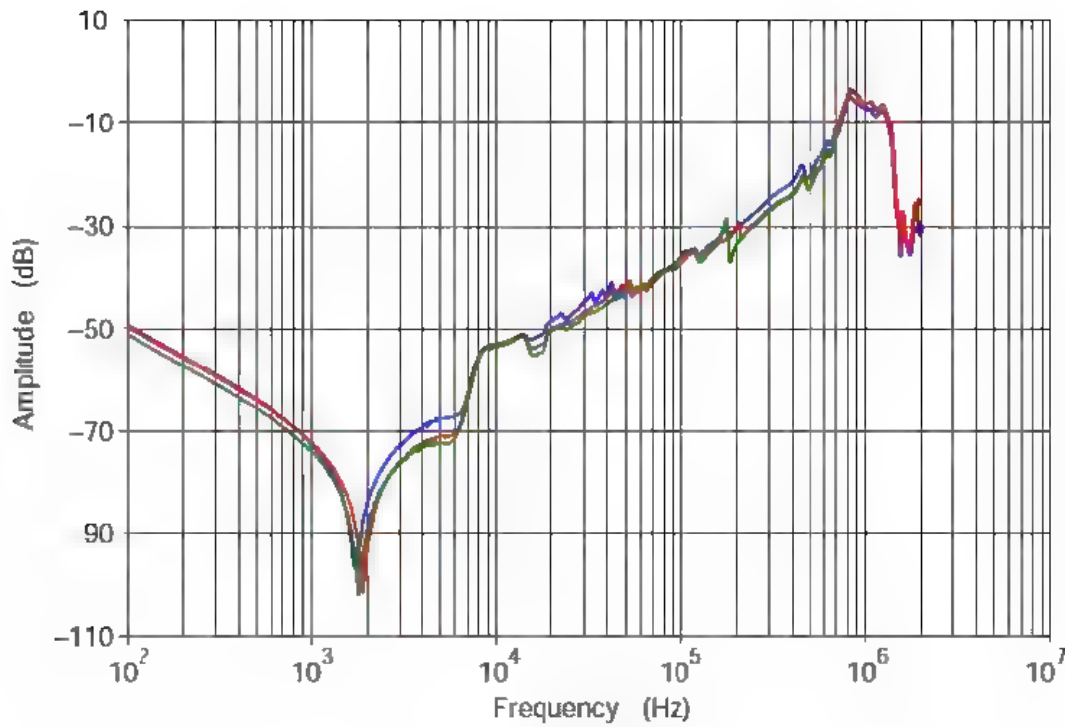
الشكل رقم (8-19)

8.2 الطريقة الثانية: مقارنة نتائج الفحص بنتائج فحص لمحول مُشابه تماماً من نفس المُصنَّع وله نفس المخططات الداخلية للمحول المفحوص وهو ما يُسمى بالمحول التوأم (Twin transformer) كما هو مُبين بالشكل (8-20).



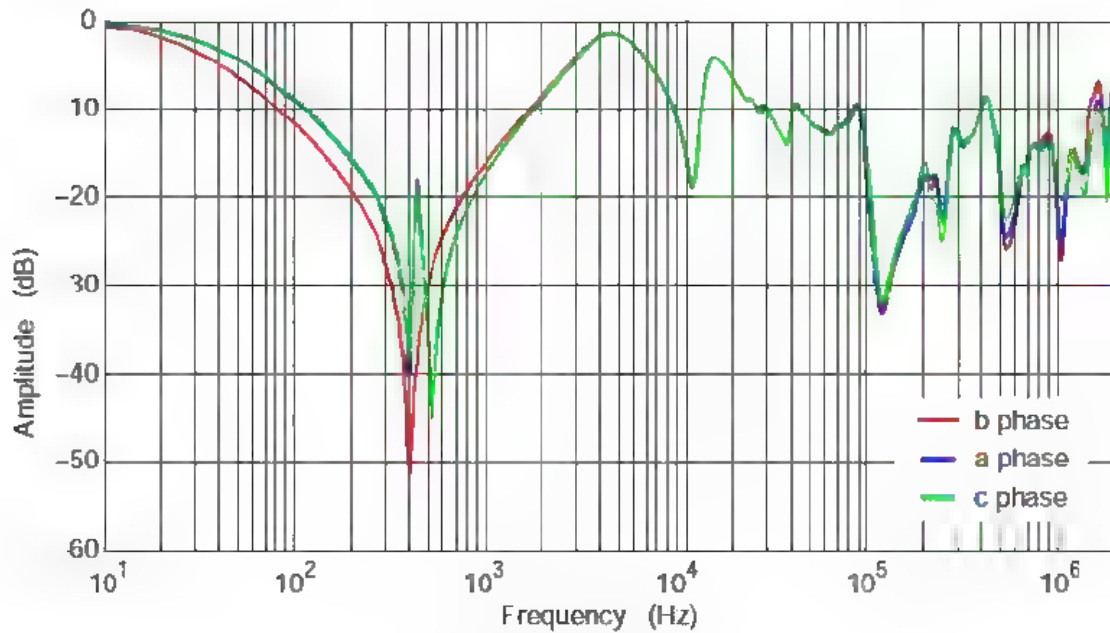
الشكل رقم (8-20)

8.3 الطريقة الثالثة: مقارنة نتائج الفحص ستائج فحص لمحول مُشابه تماماً من نفس المُصنَّع وله نفس المواصفات للمحول المفحوص ولكن قد يختلف بالتركيب الداخلي وهو ما يُسمى بالمحول الشقيق (Sister transformer) كما هو مُبين بالشكل (8-21).



الشكل رقم (8-21)

8.4 الطريقة الرابعة: مقارنة نتائج الفحص بين الأطوار المختلفة للمحول كما هو مبين بالشكل (8-22)، مع مراعاة وجود بعض الاختلافات الطبيعية بين رسمة هذه الأطوار وتعود السبب وراء ذلك لإختلاف أطوال موصلات هذه الأطوار بالإضافة لإختلاف المسافة الفاصلة بين ملفات الأطوار المختلفة وخزان المحول ولأسباب أخرى كثيرة.



الشكل رقم (8-22)

وبالرجوع لنفس المعيار [IEC, 60076-18 2012] يُمكن إيجاد بعض الأمور التي يجب ملاحظتها عند المقارنة بين النتائج الحالية والنتائج السابقة لنفس المحول أو لمحول مُشابه أو أثناء المُقارنة بين الأطوار وذلك لتحليل أمثل لنتيجة هذا الفحص ومن هذه المعايير:

- الاختلاف في الشكل العام لرسمه الإستجابة (Frequency response).
- اختلاف عدد مرات حدوث الرنين (Resonance) وهي القيم المرتفعة في الرسمه (Maxima)، بالإضافة لاختلاف عدد مرات حدوث الرنين العكسي (Antiresonance) وهي القيم المنخفضة بالرسمه (Minima).
- حدوث إزاحة للرسمه.

9. أمثلة على أنماط نتائج وفقاً لنوع العطل

تنوعت الأعطال الميكانيكية التي قد تُصيب الملفات أو القلب الحديدي للمحول وفقاً لنوع القوى الميكانيكية المؤثرة على المحول، فمنها ما قد يكون على شكل قوى كهرومغناطيسية ناتجة عن مرور تيارات عطل مرتفعة في الملفات ومنها ما هو ميكانيكي بحت كتعرُّض المحول للسقوط أو الصدمات.

لذلك أوردت المعايير الصادرة عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE, C57.149-2012] مجموعة من النتائج المُتوقعة في حال تعرُّض المحول لأنواع المختلفة من الأعطال الميكانيكية لمملعاته أو قلبه الحديدي كالآتي:

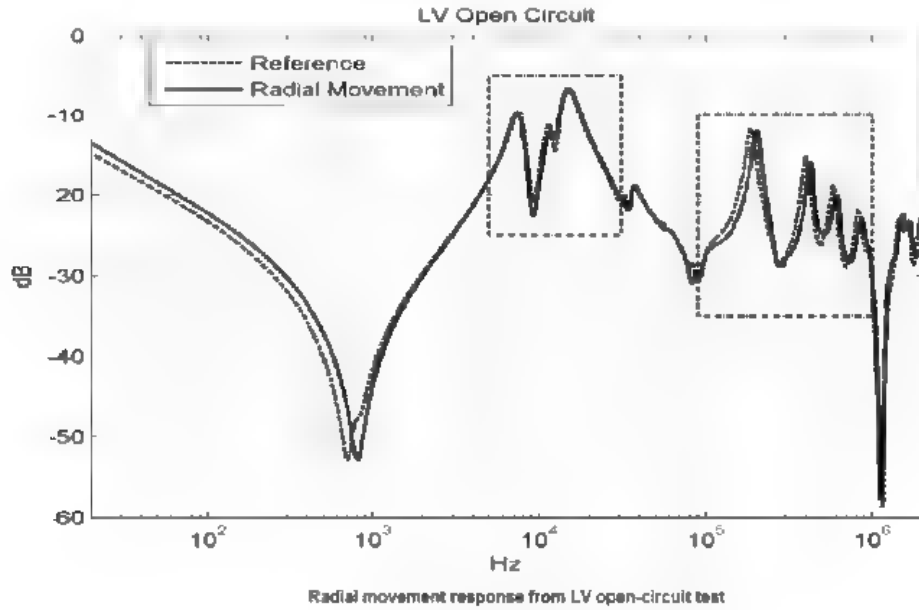
9.1 تشوه الملفات الشعاعي/القطري – Radial winding deformation

عند تعرُّض المحول لهذا النوع من الأعطال فإن تأثيره على نتيجة الفحص تبعاً للتردد يكون كما هو موضح في الجدول (8-2) الآتي والأشكال (8-23&24)، على فرض تعرُّض المحول لهذا النوع من الأعطال فقط [IEEE, C57.149-2012]:

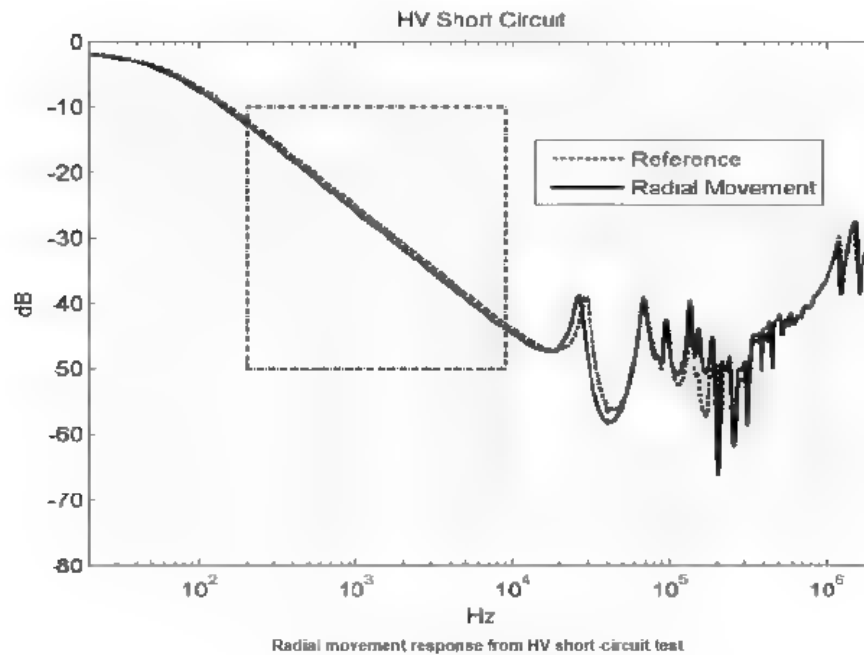
الجدول رقم (8-2)

نطاق التردد	التأثير على نتيجة الفحص
10Hz – 10kHz	- أسبوب الدائرة المفتوحة – End to End open circuit يشكل عام هذا النطاق من الترددات لا يتأثر بتشوه الملفات الشعاعي/القطري. - أسبوب دائرة المقصورة – End to End short circuit قد يؤدي لإرتفاع المعاوقة وما يصاحبه من إنخفاض طفيف في الرسمه.
5kHz – 100kHz	- أسبوب الدائرة المفتوحة والمقصورة End to End open/short circuit قد تحدث إزاحة للرسمه أو قد تظهر بعض قمم رنين (Resonance) أو إنخفاضات رنين عكسي (Antiresonance) تبعاً لخطورة وشدة التشوه الذي حدث للملفات، حيث أن التأثير على هذا النطاق من الترددات يكون صغير وقد يصعب كشفه.
50kHz – 1MHz	أسبوب اندائرة امفتوحة والمقصورة End to End open/short circuit

<p>قد تحدث إزاحة للرسمه أو قد تظهر بعض قمم رنين (Resonance) أو إنخفاضات رنين عكسي (Antiresonance) تبعاً لخطورة وشدة التشوه الذي حدث للملفات، حيث أن التأثير على هذا النطاق من الترددات يكون الأكثر وضوحاً لهذا النوع من الأعطال. مع إمكانية تأثير هذه النوع من الأعطال على نتيجة المنفات الأخرى بدرجة أقل من الملفات المتعرضة للعطل.</p>	
<p>- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – End to End open/short circuit شكل عام هذا البصاق من الترددات لا تتأثر بتشوه الملفات الشعاعي/القطري إلا في حالات تشوه الملفات الكبير الذي قد يظهر في هذا النطاق.</p>	<p>أكبر من 1MHz</p>



الشكل رقم (8-23)



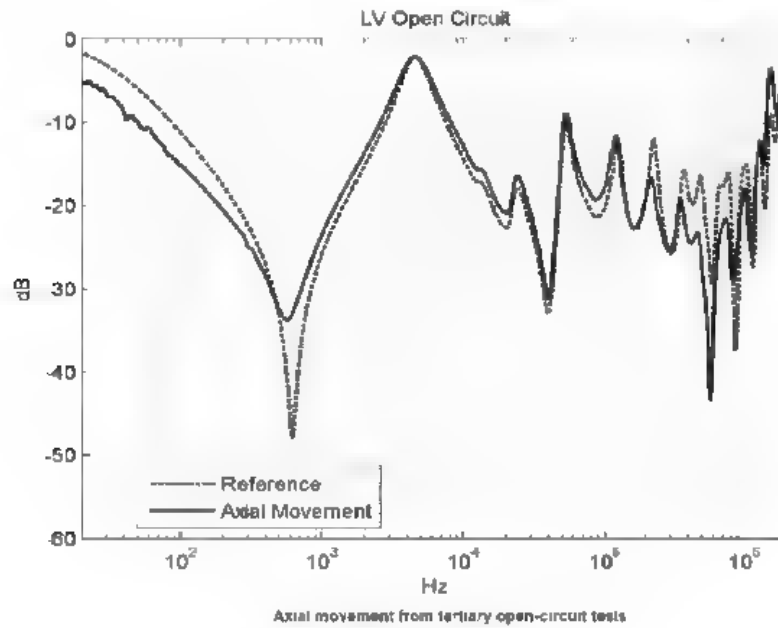
الشكل رقم (8-24)

9.2 تشوه الملفات المحوري – Axial winding deformation

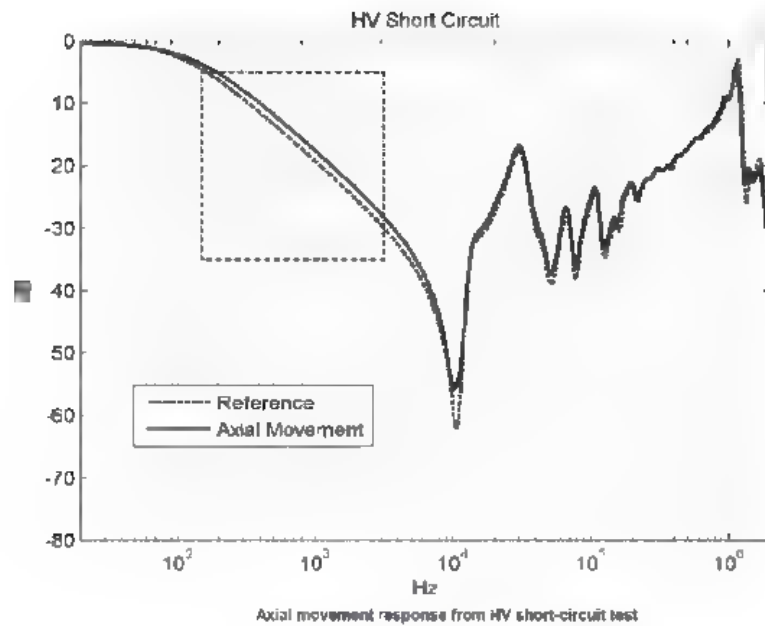
عند تعرّص المحول لهذا النوع من الأعطال فإن تأثيره على نتيجة المحصّ تبعاً للتردد يكون كما هو موضح في الجدول (8-3) الآتي والأشكال (8-25&26)، على فرض تعرّص المحول لهذا النوع من الأعطال فقط [IEEE, C57.149-2012]:

الجدول رقم (8-3)

نطاق التردد	التأثير على نتيجة الفحص
10Hz – 10kHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة – End to End open circuit بشكل عام هذا النطاق من الترددات لا يتأثر بتشوه الملفات المحوري. - أسلوب الدائرة المقصورة – End to End short circuit قد يؤدي لتغير المعاوقة وما يصاحبه من تغير طفيف في الرسم.
5kHz – 100kHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – End to End open/short circuit قد تحدث إزاحة للرسم أو قد تظهر بعض قمم رنين (Resonance) أو إنخفاضات رنين عكسي (Antiresonance) تبعاً لخطورة وشدة التشوه الذي حدث للملفات، حيث أن التأثير على هذا النطاق من الترددات يكون الأكثر وضوحاً لهذا النوع من الأعطال. مع إمكانية تأثير هذه النوع من الأعطال على نتيجة الملفات الأخرى بدرجة أقل من الملفات المتعرضة للعطل.
50kHz – 1MHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – End to End open/short circuit قد تحدث إزاحة للرسم أو قد تظهر بعض قمم رنين (Resonance) أو إنخفاضات رنين عكسي (Antiresonance) تبعاً لخطورة وشدة التشوه الذي حدث للملفات، مع إمكانية تأثير هذه النوع من الأعطال على نتيجة الملفات الأخرى بدرجة أقل من الملفات المتعرضة للعطل.
أكبر من 1MHz	- أسلوب اندائرة المفتوحة والمقصورة – End to End open/short circuit بشكل عام هذا النطاق من الترددات لا تتأثر بتشوه الملفات المحوري.



الشكل رقم (8-25)



الشكل رقم (8-26)

9.3 إزاحة كُلية للملفات – Bulk winding movement

عند تعرّض المحول لهذا النوع من الأعطال فإن تأثيره على نتيجة الفحص تبعاً للتردد يكون كما هو موضح في الجدول (8-4) الآتي على فرض تعرّض المحول لهذا النوع من الأعطال فقط [IEEE, C57.149-2012]:

الجدول رقم (8-4)

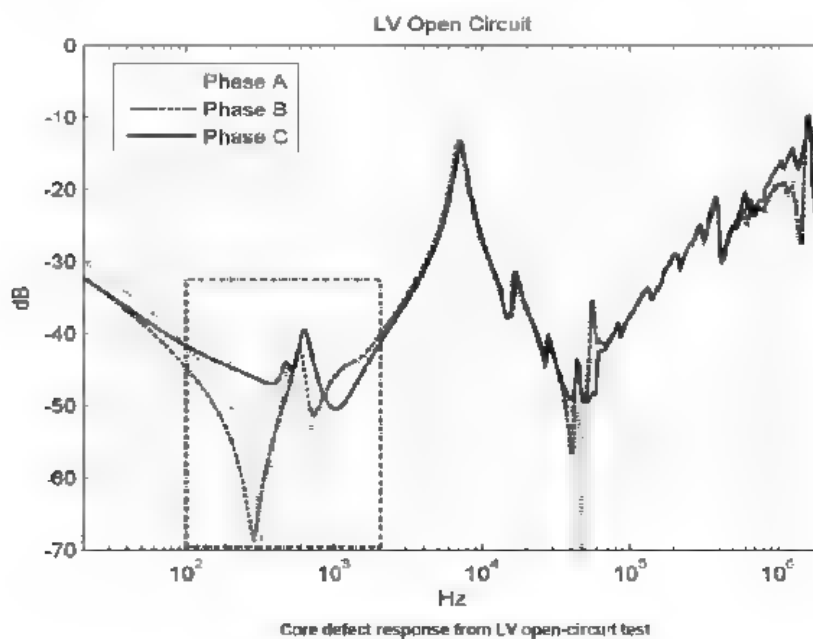
نطاق التردد	التأثير على نتيجة الفحص
10Hz – 10kHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة – End to End open circuit بشكل عام هذا النطاق من الترددات لا يتأثر بتشوّه الملفات. أسلوب اندائرة المقصورة – End to End short circuit بشكل عام هذا النطاق من الترددات لا يتأثر بتشوّه الملفات.
5kHz – 100kHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – End to End open/short circuit ظهور بعض قمم رنين (Resonance) أو إنخفاضات رنين عكسي (Antiresonance) تبعاً لمقدار حركة الملفات (إزاحتها) علماً بأن هذه السمة تُعد الأبرز في حال حدوث هذا النوع من الأعطال بالإضافة إلى احتمالية حدوث إزاحة للرسم، حيث أن التأثير على هذا النطاق من الترددات يكون الأكثر وضوحاً لهذا النوع من الأعطال. مع إمكانية تأثير هذه النوع من الأعطال على نتيجة الملفات الأخرى بدرجة أقل من الملفات المتعرضة للعطل.
50kHz – 1MHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – End to End open/short circuit بشكل عام هذا الصاق من الترددات لا يتأثر بهذا النوع من الأعطال، مع إمكانية التأثير على منطقة الترددات المرتفعة من هذا النطاق في حال حدوث إختلاف للمواسعة (C_L)
أكبر من 1MHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – End to End open/short circuit حدوث إختلاف للمواسعة (C_L) قد يؤدي لإزاحة قِمم الرنين (Resonance).

9.4 أعطال القلب الحديدي – Iron core defects

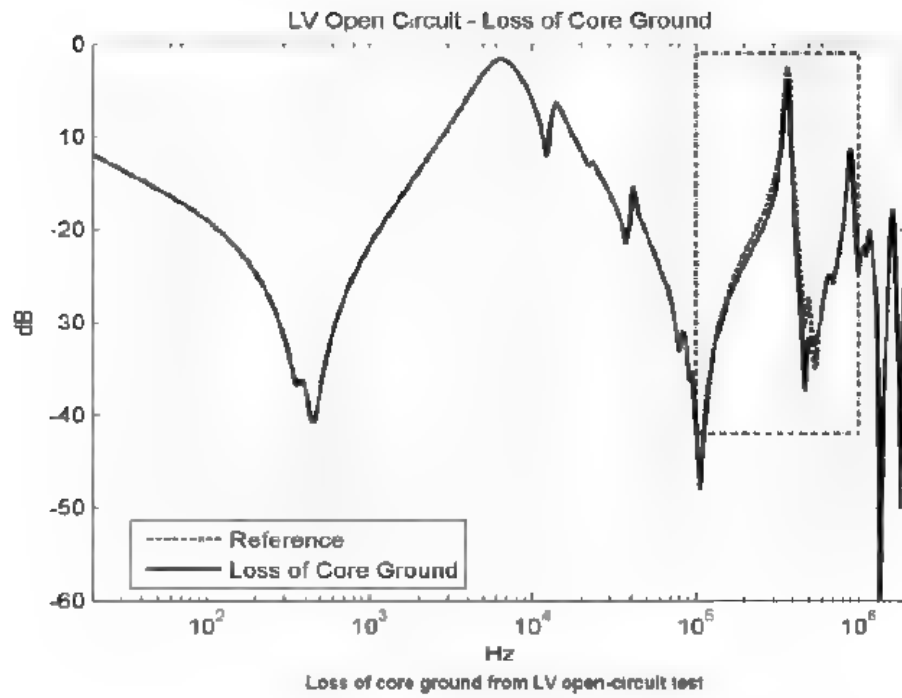
عند تعرّض القلب الحديدي للمحول للأعطال فإن ذلك يؤدي لتغيّر دائرته المعنطيسية مما بدوره يؤدي لإحتلاف نتيجة هذه الفحص ويتيح الكشف عن هذا النوع من الأعطال، حيث تتنوع أعطال القلب القلب الحديدي من حرق الرقائق المكوّنة للقلب الحديدي أو وجود دائرة قصر بين هذه الرقائق أو وجود نقاط تأريض متعددة غير مرغوب بها أو فقدان تأريض هذا القلب الحديدي وغيرها من الأعطال التي قد تؤثر على نتيجة الفحص تبعاً للتردد كما هو موضح في الجدول (8-5) الآتي والأشكال (8-27&28)، على فرض تعرّض المحول لهذا النوع من الأعطال فقط [IEEE, C57.149-2012]:

الجدول رقم (8-5)

نطاق التردد	التأثير على نتيجة الفحص
10Hz – 10kHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة – End to End open circuit أعطال القلب الحديدي تؤثر على هذا النطاق من الترددات بالتحديد، ويكون التأثير على شكل إحتلاف في شكل رسمة الإستجابة مع إتمالية قليلة لحدوث إزاحة لرسمه الإستجابة. - أسلوب الدائرة المقصورة – End to End short circuit بشكل عام هذا النطاق من الترددات لا يتأثر بأعطال القلب الحديدي.
5kHz – 100kHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – End to End open/short circuit إتمالية ظهور بعض قمم رنين (Resonance) أو إنخفاضات رنين عكسي (Antiresonance) أو إزاحة لرسمه الإستجابة.
50kHz – 1MHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – End to End open/short circuit بشكل عام هذا النطاق من الترددات لا يتأثر بهذا النوع من الأعطال، مع إمكانية التأثير على منطقة الترددات المرتفعة من هذا النطاق (إزاحة لرسمه الإستجابة) في حال حدوث أعطال في تأريض القلب الحديدي.
أكبر من 1MHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – End to End open/short circuit حدوث أعطال في تأريض القلب الحديدي قد يؤدي لإزاحة لرسمه الإستجابة.



الشكل رقم (8-27)



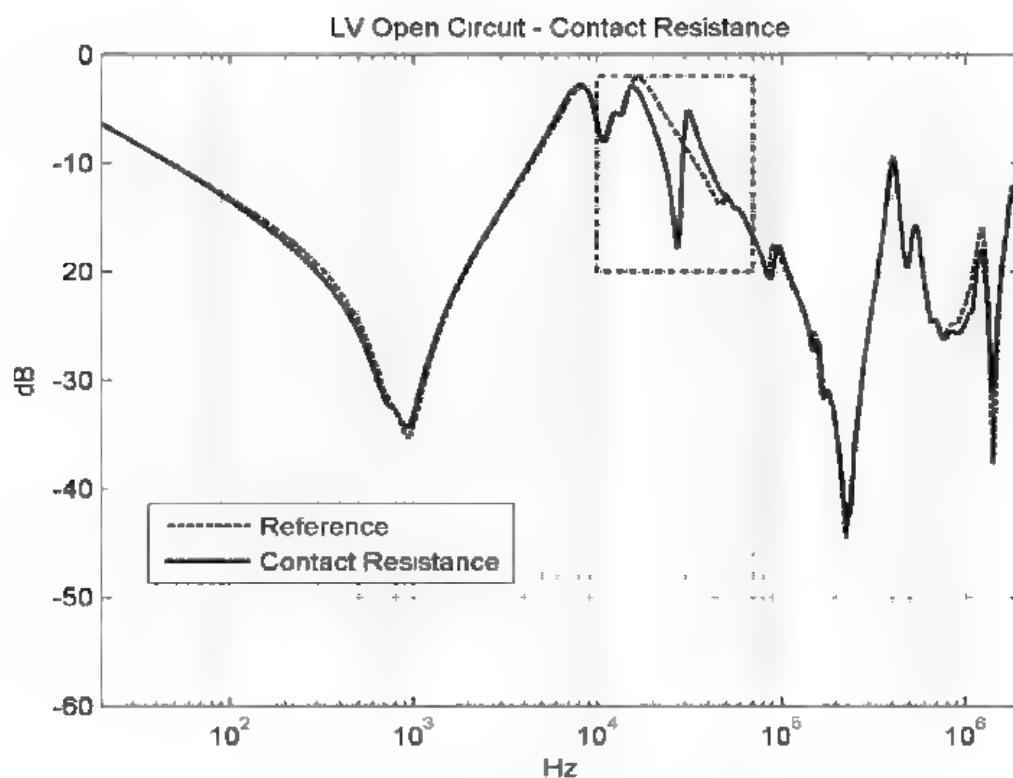
الشكل، رقم (8-28)

9.5 مقاومة تلامس مرتفعة – High contact resistance

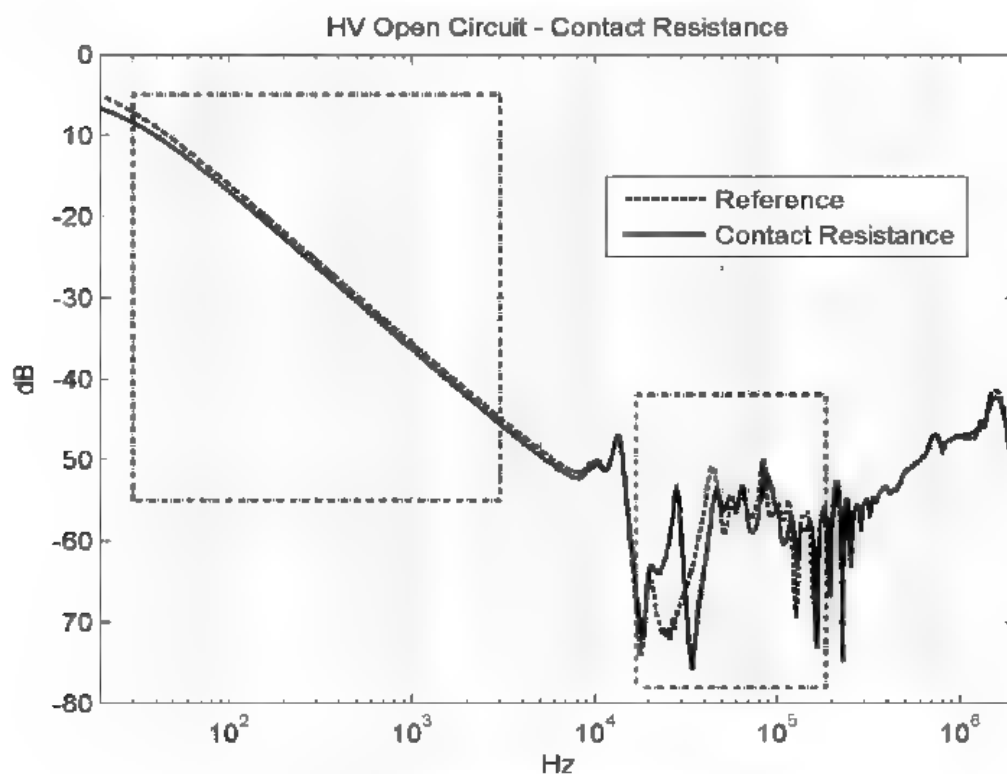
قد يحدث إرتفاع لقيمة مقاومة التلامس داخل المحول خاصة لنقاط إلتقاء الأسطح المعدنية ببعضها البعض نتيجة لإرتخائها أو تأكلها كنقاط إلتقاء موصلات عوازل الإختراق (Bushing) بالملفات أو نقاط إلتقاء موصلات مُغَيِّر الخطوة (Tap changer) بالملفات، ويكون تأثير هذا النوع من الأعطال على نتيجة الفحص كما هو موضح في الجدول (8-6) الآتي والأشكال (8-29&30)، على فرض تعرُّض المحول لهذا النوع من الأعطال فقط [IEEE, C57.149-2012]:

الجدول رقم (8-6)

نطاق التردد	التأثير على نتيجة الفحص
10Hz – 10kHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة – End to End open circuit بشكل عام هذا النطاق من الترددات لا يتأثر بقيمة مقاومة التلامس.
5kHz – 100kHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – End to End open/short circuit إحتمالية ظهور بعض قمم رنين (Resonance) أو إنخفاضات رنين عكسي (Antiresonance) أو إزاحة لرسمه الإستجابة.
50kHz – 1MHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – End to End open/short circuit إحتمالية ظهور بعض قمم رنين (Resonance) أو إنخفاضات رنين عكسي (Antiresonance) أو إزاحة لرسمه الإستجابة.
أكبر من 1MHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – End to End open/short circuit إحتمالية ظهور بعض قمم رنين (Resonance) أو إنخفاضات رنين عكسي (Antiresonance) أو إزاحة لرسمه الإستجابة.



الشكل رقم (8-29)



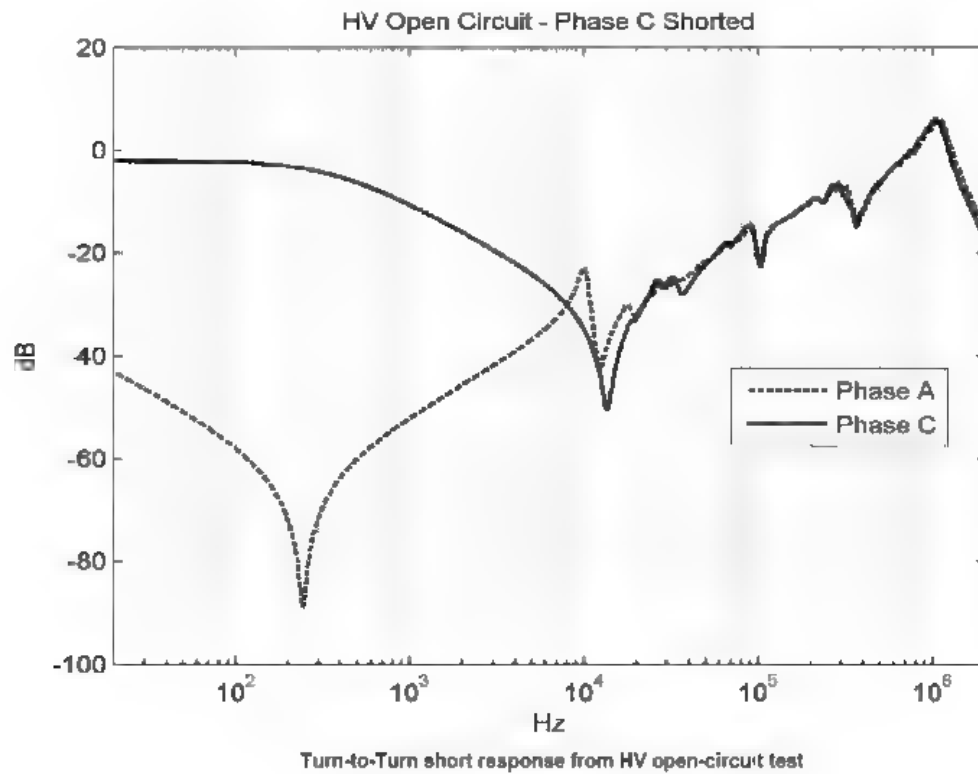
الشكل رقم (8-30)

9.6 قِصْر بين اللفات – Turn to turn short circuit

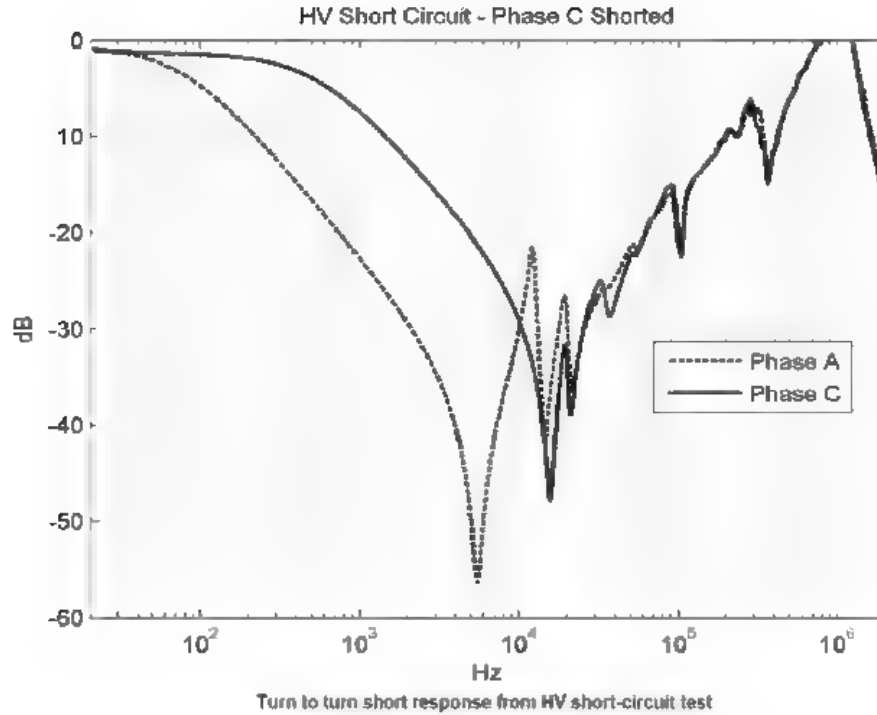
في حال تعرّض المحول لهذا النوع من الأعطال والذي يكون على شكل قِصْر بين اللفات من الطور الواحد أو بين اللفات من الأطوار المختلفة فإن ذلك من شأنه التأثير على نتيجة الفحص كما هو موضح في الجدول (8-7) الآتي والأشكال (8-31&32)، على فرض تعرّض المحول لهذا النوع من الأعطال فقط [IEEE C57.149-2012]

الجدول رقم (8-7)

نطاق التردد	التأثير على نتيجة الفحص
10Hz – 10kHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة – End to End open circuit وجود هذا اعطال سيؤدي تأثير القلب الحديدي على نتيجة الفحص ويصبح شبيه بنتيجة الفحص بأسلوب دائرة القِصْر (SFRA – end to end short circuit)
5kHz – 100kHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – End to End open/short circuit إحتمالية ظهور بعض قمم رنين (Resonance) أو إنخفاضات رنين عكسي (Antiresonance) أو إزاحة لرسمه الإستجابة.
50kHz – 1MHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – End to End open/short circuit إحتمالية ظهور بعض قمم رنين (Resonance) أو إنخفاضات رنين عكسي (Antiresonance) أو إزاحة لرسمه الإستجابة.
أكبر من 1MHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – End to End open/short circuit إحتمالية ظهور بعض قمم رنين (Resonance) أو إنخفاضات رنين عكسي (Antiresonance) أو إزاحة لرسمه الإستجابة.



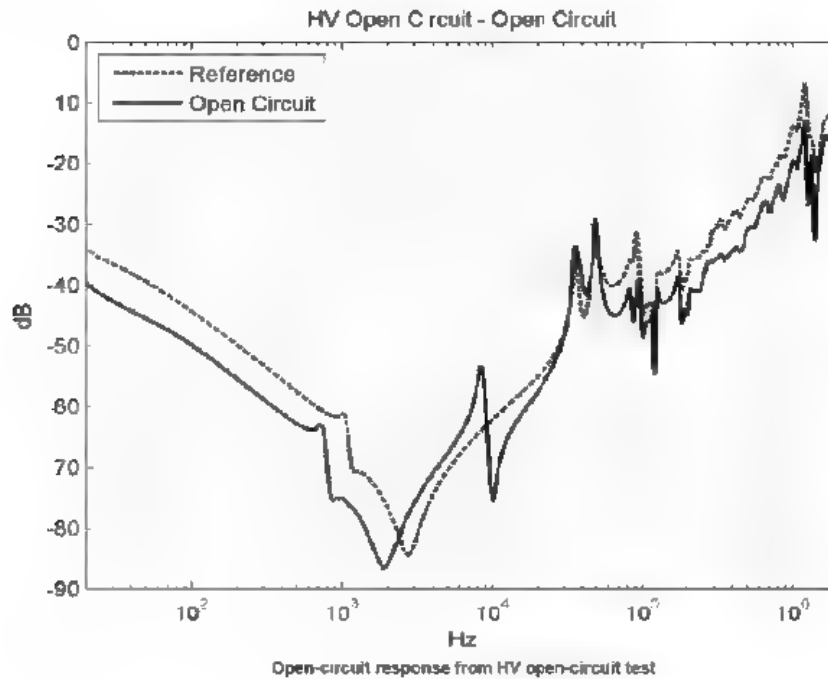
الشكل رقم (8-31)



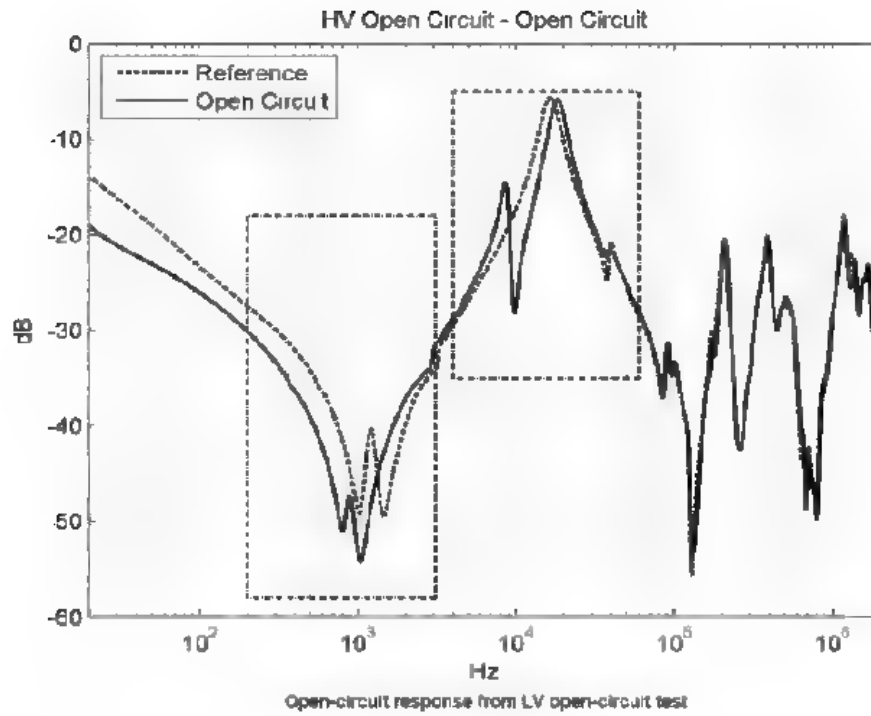
الشكل رقم (8-32)

9.7 قُطع في دائرة الملفات – Winding open circuit

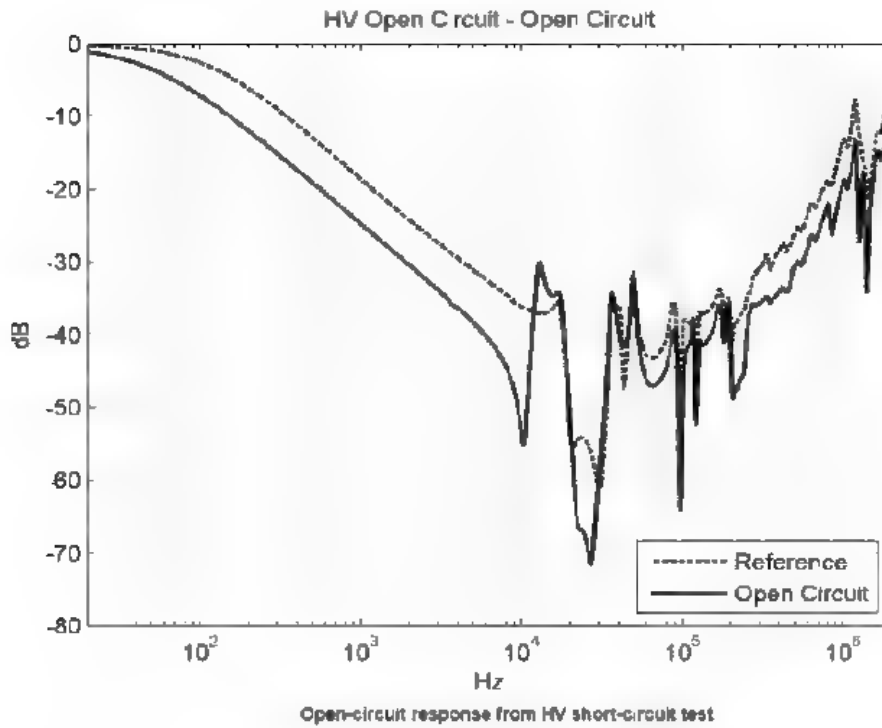
في حال تعرّض المحول لهذا النوع من الأعطال فإن ذلك يؤدي لإرتفاع مُعاوقة (Impedance) الدائرة تحت الفحص وهذا من شأنه التأثير على نتيجة الفحص والذي يكون عادةً على شكل إزاحة لرسمه الإستجابة للأسفل نتيجة لإرتفاع قيمة المُعاوقة كما هو موضح في الأشكال (8-33&34&35)، على فرض تعرّض المحول لهذا النوع من الأعطال فقط [IEEE, C57.149-2012]:



الشكل رقم (8-33)



الشكل رقم (8-34)



الشكل رقم (8-35)

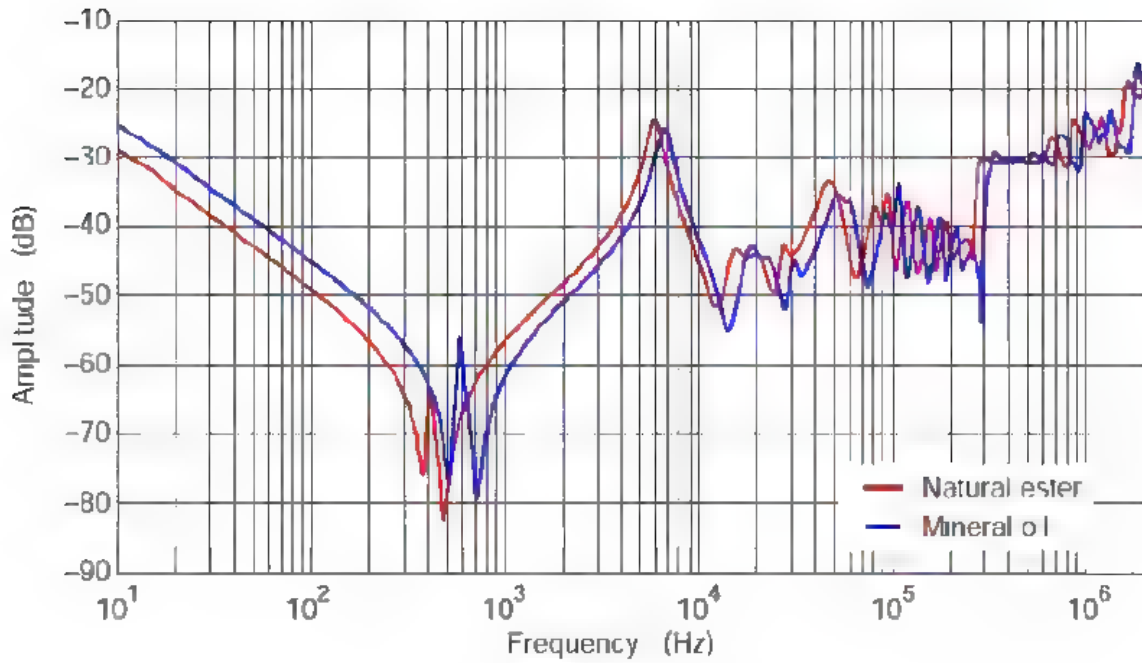
ولمزيد في هذا الخصوص يُمكن إيجاد المحلق (8-2) والذي يَضم مُلخص لبعض أعطال المحولات وتأثيرها على نتيجة فحص الإستجابة الترددية وفقاً لمجموعة من المعايير والدراسات والنشرات الفنية كما ورد [Mohd Yousof, Frequency Response Analysis for Transformer Winding Condition Monitoring – University of Queensland]

10. العوامل المؤثرة على نتيجة الفحص

هنالك عدة عوامل مؤثرة على نتيجة هذا الفحص والتي لا بُد من الإحاطة بها من أجل تحديد تأثيرها أو التحفيف منه على الأقل أو أخذها بعين الاعتبار عند تحليل نتائج هذا الفحص، ومن هذه العوامل:

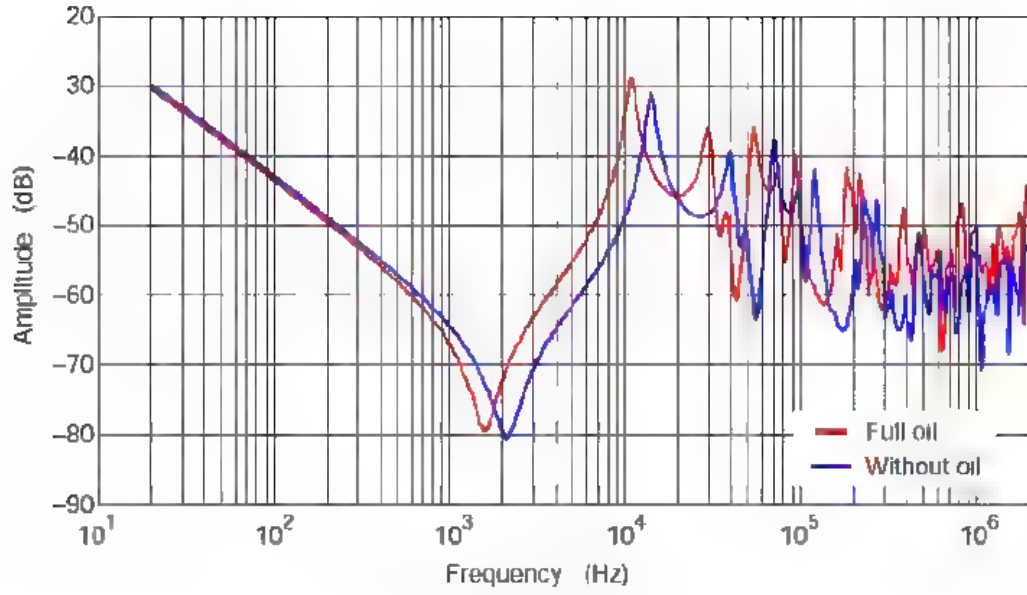
10.1 تأثير زيت المحول - Transformer oil effect

كما هو معلوم أن نفاذية الزيت المعدني (Mineral oil permittivity) تختلف عن نفاذية الزيت النباتي (Natural Ester) وكذلك عن نفاذية الهواء، حيث أن نفاذية الزيت النباتي (Natural Ester) مرتفعة مقارنة بنفاذية الزيت المعدني (Mineral oil) مما يزيد من المواسعة الكلية للمحول وهذا بدوره يُقلل من قيمة ترددات الرنين (Resonance frequencies) والذي من شأنه عمل إزاحة لرسمه الإستجابة (Frequency response) نحو الترددات المنخفضة كما هو مُبين في الشكل (8-36) الذي يوضح إختلاف نتيجة فحص (SFRA) تبعاً لنوع الزيت المستخدم في المحول فيما إذا كان زيت نباتي (Natural ester) أو زيت معدني (Mineral oil) كما ورد في المعيار الصادر عن اللجنة الكهروتقنية الدولية - [IEC, 60076-18 2012].



الشكل رقم (8-36)

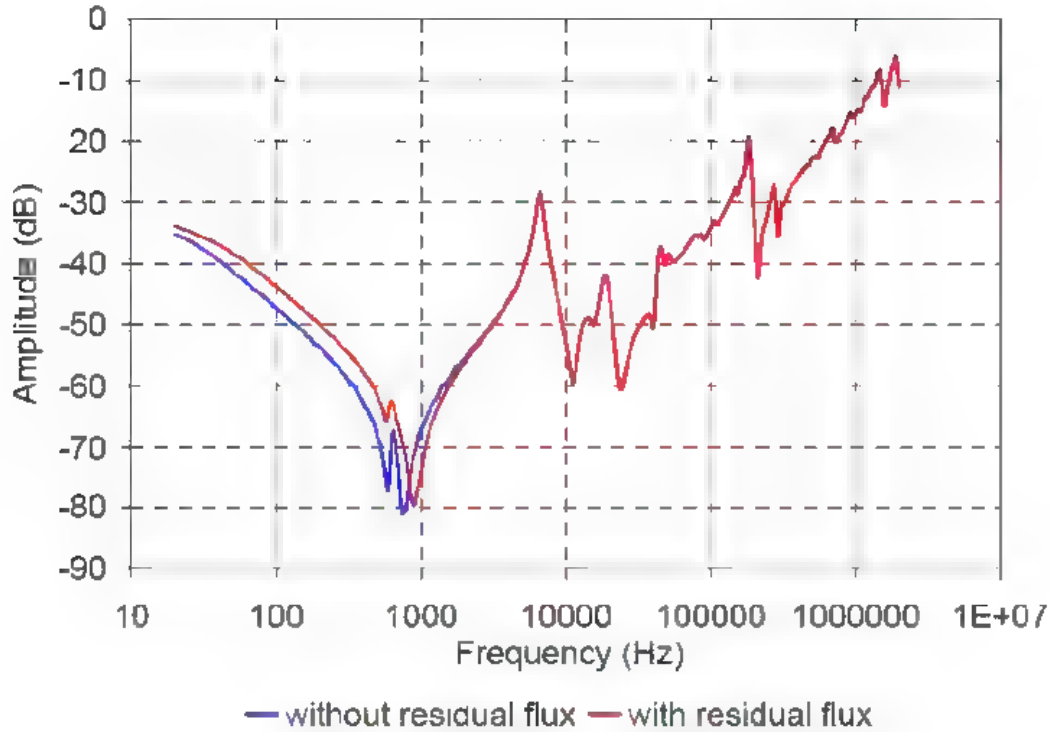
الشكل (8-37) يوضح إختلاف نتيجة فحص (SFRA) لمحول في حال كان مُفرغ من الزيت وفي حال إحتوائه على الزيت العازل كما ورد في المعيار الصادر عن اللجنة الكهروتقنية الدولية - [IEC, 60076-18 2012].



الشكل رقم (8-37)

10.2 تأثير مغناطيسية القلب الحديدي المُتبقيّة – Core residual magnetism effect

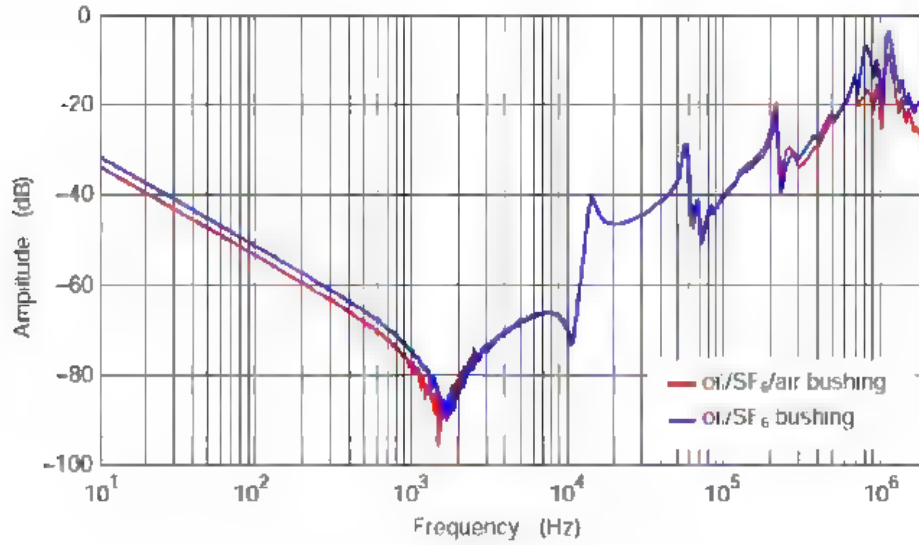
إن مغناطيسية القلب المُتبقيّة من شأنها التأثير على نتيجة هذا المحص للترددات الأقل من (5kHz)، والشكل (8-38) يوضح نتيجة فحص (SFRA) لمحول قبل وبعد إجراء فحص مقاومة الملفات الذي من شأنه بناء مغناطيسية مُتبقيّة في القلب الحديدي، حيث يُظهر تأثير هذه المغناطيسية المُتبقيّة على الترددات المنخفضة، أما للترددات المرتفعة فإن نتيجة الفحص مُطابقة كما ورد في المعيار الصادر عن اللجنة الكهروتقنية الدولية [IEC, 60076-18 2012].



الشكل رقم (8-38)

10.3 تأثير عوازل الإختراق – Transformer bushings effect

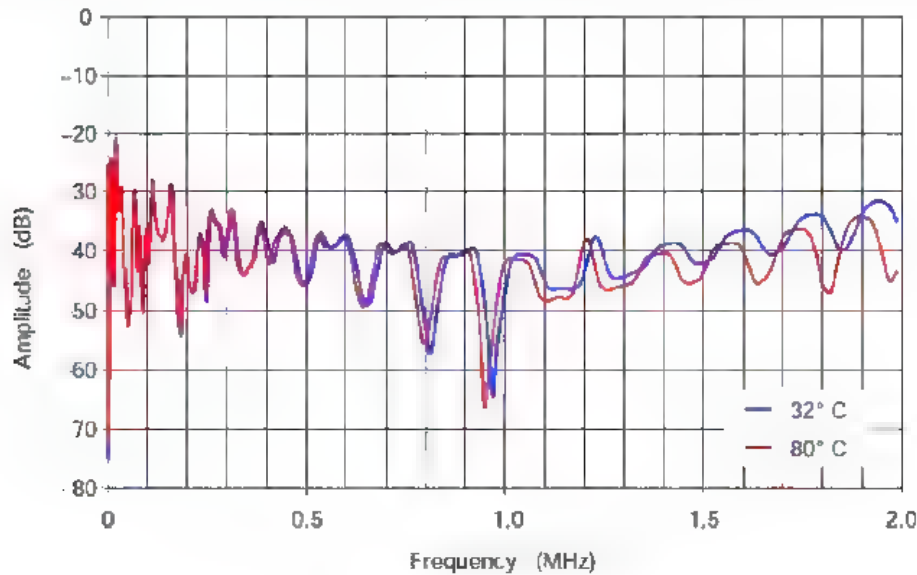
عادة ما يتم استخدام عوازل إختراق (Bushings) أثناء الفحص القصني لغايات الفحص فقط، تختلف عن نظيرتها التي يتم تركيبها في الموقع مما يولد إختلاف في نتيجة الفحص خاصة للترددات المرتفعة كما يظهر في الشكل (8-39) كما ورد في المعيار الصادر عن اللجنة الكهروتقنية الدولية [IEC, 60076-18 2012].



الشكل رقم (8-39)

10.4 تأثير درجة الحرارة – Temperature effect

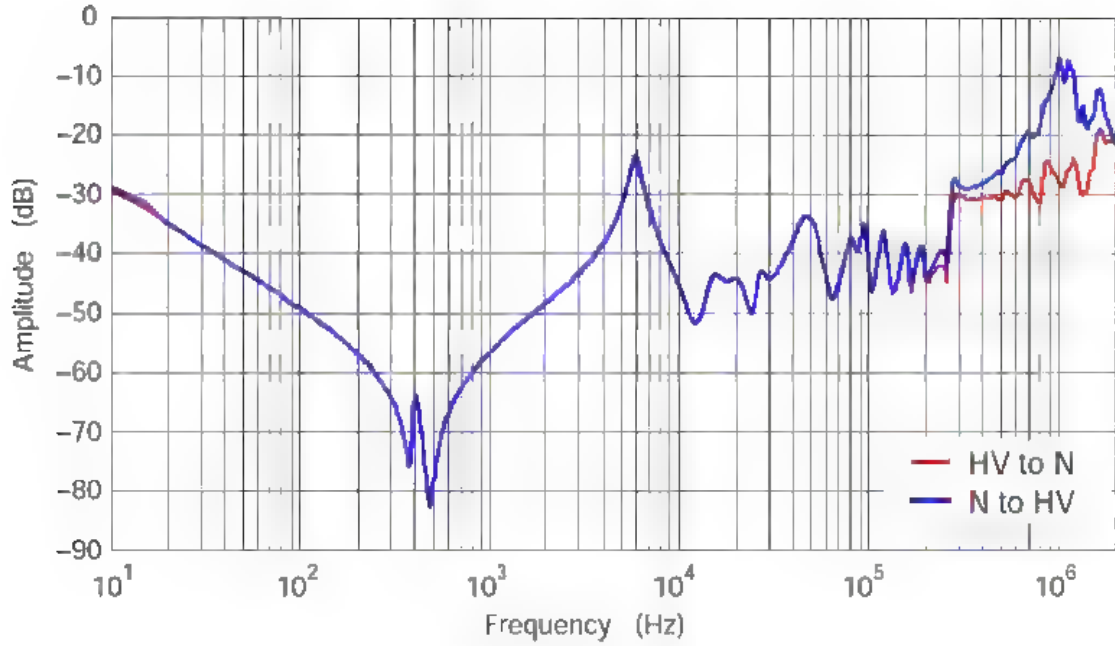
إن التغير في درجة الحرارة يؤثر على نتيجة هذا الفحص خاصة إذا كان هذا التغير أكثر من (50°) درجة مئوية كما هو مبين في الشكل (8-40) كما ورد في المعيار الصادر عن اللجنة الكهروتقنية الدولية [IEC, 60076-18 2012]، حيث أن التغير في درجة الحرارة يُصاحبه تغير في مقاومة ملفات المحول بالإضافة لتغير في كثافة وحجم وثاث العزل الخاص بزيت المحول مما يؤدي بدوره لإختلاف نتيجة هذا الفحص



الشكل رقم (8-40)

10.5 اتجاه القياسات – Measurement direction

كما ذكر سابقاً أن اتجاه الفحص (تطبيق موجة الفحص على أطراف الخط (Line) وقياسها من نقطة التعادل (Neutral) أو العكس) لا يؤثر على نتيجة الفحص وذلك عند فحص الملفات الموصولة على شكل نجمة (Star/Y)، ولكن هذا لا يعني عدم وجود اختلاف في نتيجة الفحص خاصة للترددات المرتفعة كما هو مبين في الشكل (41-8) كما ورد في المعيار الصادر عن اللجنة الكهروتقنية الدولية - [IEC, 60076-18, 2012]، لذلك يُنصح باستخدام نفس توصيلة الفحص المستخدمة في الفحوصات السابقة المُراد المقارنة بها.



الشكل رقم (41-8)

11. فحوصات إضافية دأمة

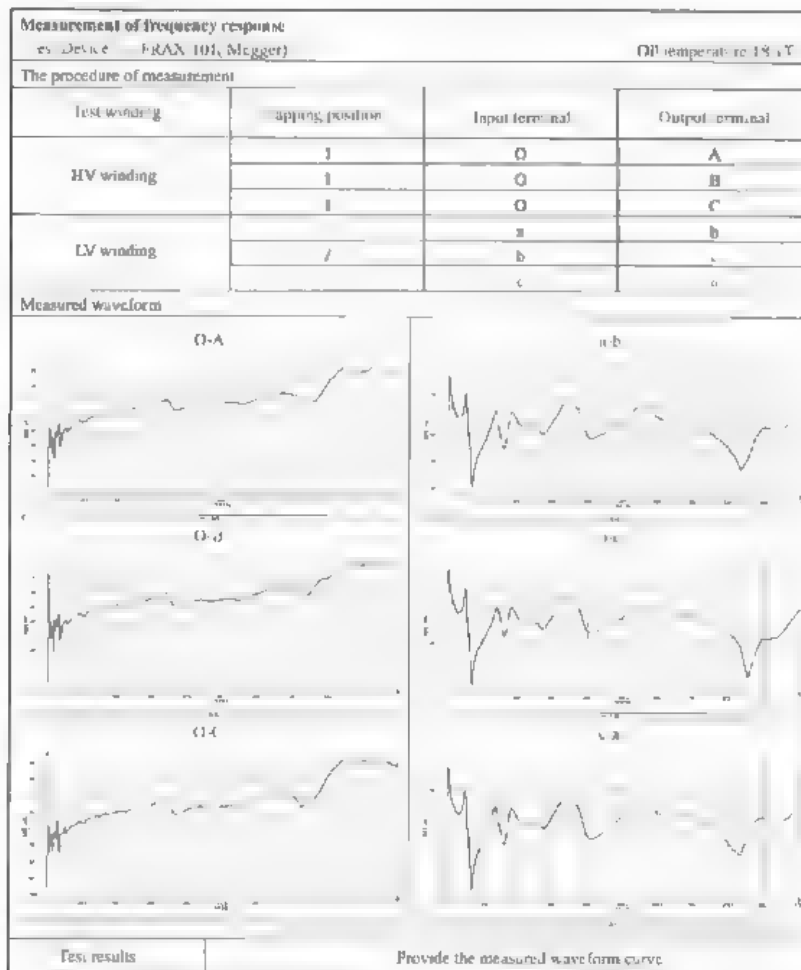
تُعتبر المحولات من المُعدات ذات الأهمية القصوى في المنظومة الكهربائية لما لها من دور في ديمومة سريان التيار الكهربائي عن طريق ربط عناصر المنظومة الكهربائية جميعها بالإضافة إلى تكلفتها المادية المرتفعة، لذلك لا يُمكن الإعتماد على فشل فحص واحد لتقييم حالة المحول والبدء بعمل الإجراءات التصحيحية لهذا المحول، بل يجب عمل فحوصات أخرى من شأنها تأكيد ما تم الكشف عنه في هذا الفحص و تحديد نوع العطل بالصبط ثم بعد ذلك يُصار لعمل الإجراءات التصحيحية اللازم لهذا المحول و الذي قد يتطلب التواصل مع مُصنّع هذا المحول.

فعند إجراء فحص تحليل الإستجابة الترددية المُسحي (SFRA) وكانت نتائج الفحص غير مُرضية بعد تحليلها وفقاً لما تم شرحه سابقاً، فإنه يجب إعادة الفحص بعد التأكد من جميع خطوات الفحص ومراعاة تجنّب الأمور التي تؤثر على نتيجة هذا الفحص، وفي حال الحصول على نتيجة أخرى غير مُرضية لا يُنصح بوضع المحول بالخدمة قبل عمل تفقد داخلي بالإضافة إلى عمل الإجراءات التصحيحية اللازمة ولكن لا بُد من إجراء بعض الفحوصات الأخرى وفقاً لنوع العطل المُكتشف من خلال هذا الفحص فيما إذا كان يخص الملفات أو القلب الحديدي أو غيرها من الأعطال كالآتي:

- فحص الفولتية المنخفضة التَّبْضي/التَّفْفي - (LVI) Low Voltage Impulse؛ وذلك للكشف عن الحالة الفيزيائية للقلب الحديدي وكذلك ملفات المحول.
- فحص مُفاعلة التسرُّب – Leakage Reactance test؛ وذلك للكشف عن الحالة الفيزيائية للقلب الحديدي وكذلك ملفات المحول.
- فحص تيار التهيج – Excitation system test؛ وذلك للكشف عن الحالة الفيزيائية للقلب الحديدي.
- فحص المواسعة (Overall Capacitance)؛ وذلك للكشف أيضاً عن الحالة الفيزيائية للقلب الحديدي وملفات المحول، ولكن هنالك عدة عوامل من شأنها التأثير على قيمة المواسعة غير تشوُّ الملفات مثل درجة الحرارة، بالإضافة إلى أن حساسية فحص المواسعة ليست كبيرة أي أن تشوّه أو إزاحة كبيرة في الملفات قد لا تظهر في فحص المواسعة أو قد تعطي تغيُّر طفيف على قيمة المواسعة المُقاسة.

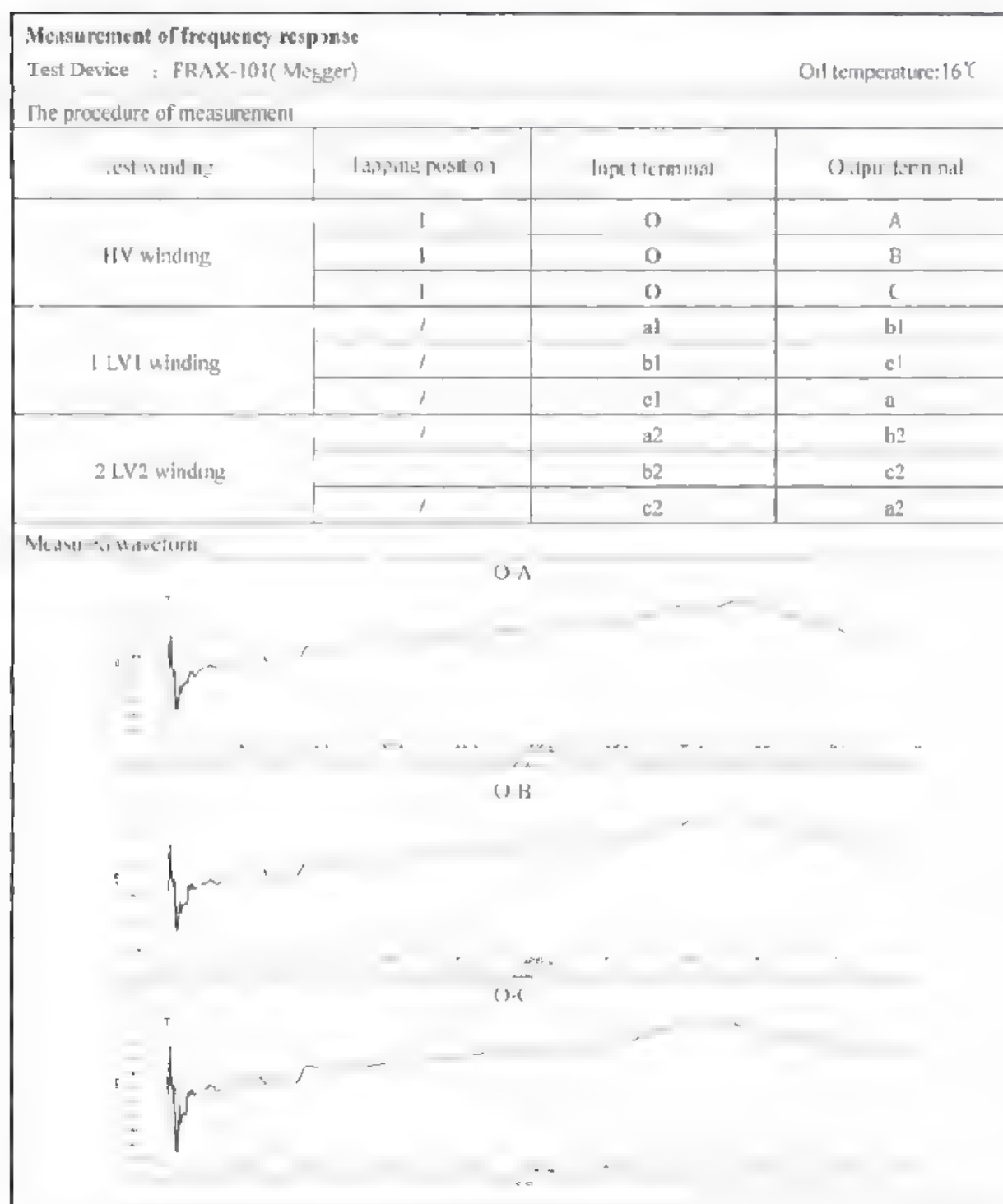
12. أمثلة على نتائج فحوصات مَصْنَعِيَّة

121 المثال الأول: الشكل (8-42) يُبين قِيَمَ فحص تحليل إستجابة ترددية مَسْجِي (SFRA) مَصْنَعِي (FAT) لمحول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (Three Phase Two Winding) موصول بطريقة (YNd11) ذو مُغَيَّر خطوة من نوع (OLTC).

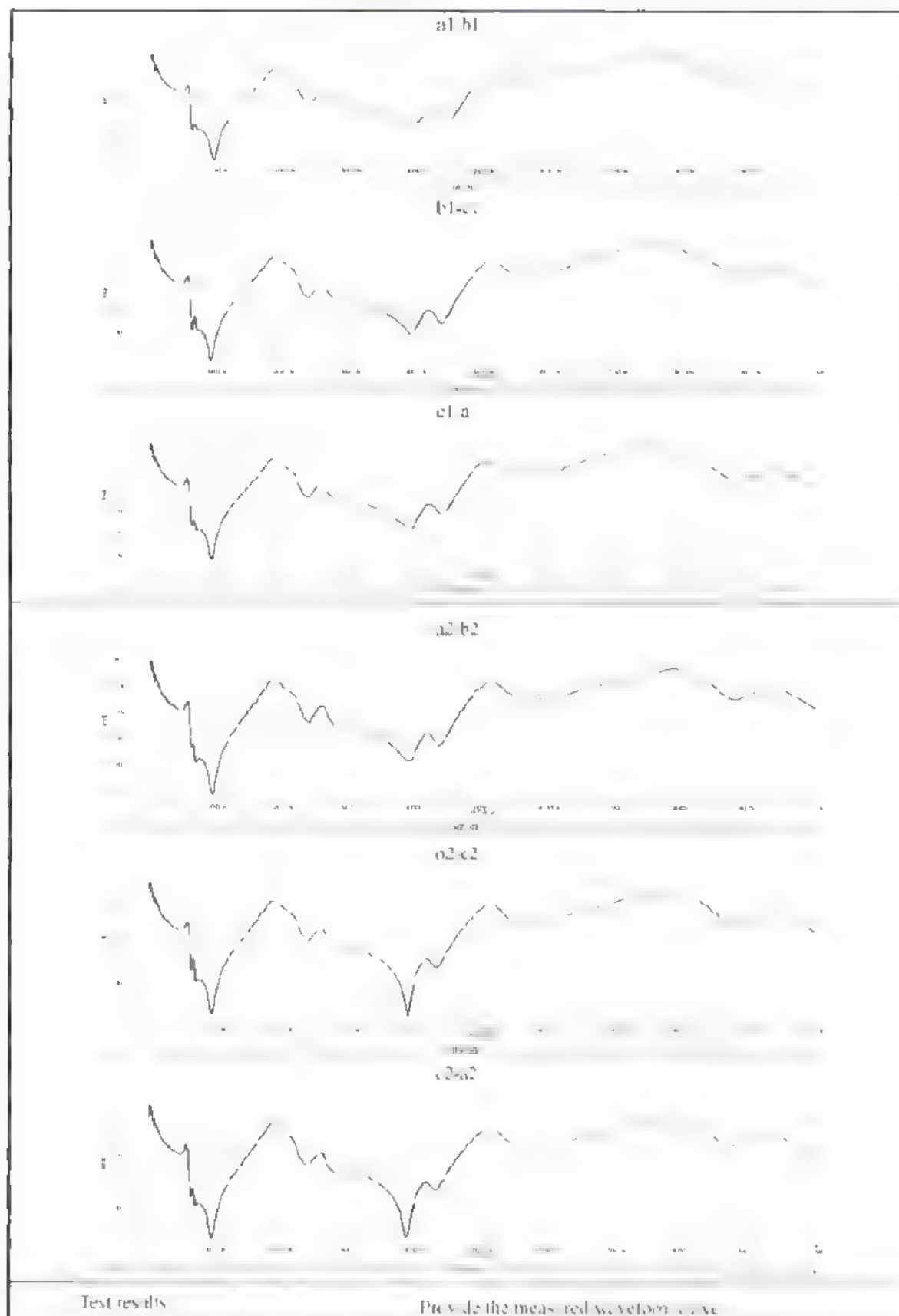


الشكل رقم (8-42)

12.2 المثال الثاني: الأشكال (8-43&44) تُبين قيم فحص إستجابة ترددية مسحي (SFRA) مصنعي (FAT) لمحول ثلاثي الأطوار ثلاثي الملتفات (Three Phase Tertiary Winding) موصول بطريقة (YNd11-d11) ذو مُغَيِّر خطوة من نوع (OLTC)



الشكل رقم (8-43)



الشكل رقم (8-44)

الملحق (8-1)

تنويه

يضم هذا الملحق خطوات الفحص وتوصيلاته بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسّط. إستناداً على الخبرة بالتعامل مع هذه الأجهزة، وتُجدر الإشارة أنه في حال إستخدام جهاز الفحص المُشار إليه في هذا الملحق لا يجب الإعتماد على هذا الملحق فقط، بل يجب قراءة الكُتيبات التفصيلية الخاصة بهذا الجهاز والمزودة بواسطة الشركة المُصنعة للجهاز جيداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية و السلامة العامة

فحص تحليل الإستجابة الترددية المَسحي بإستخدام جهاز FRAX 99 by MEGGER

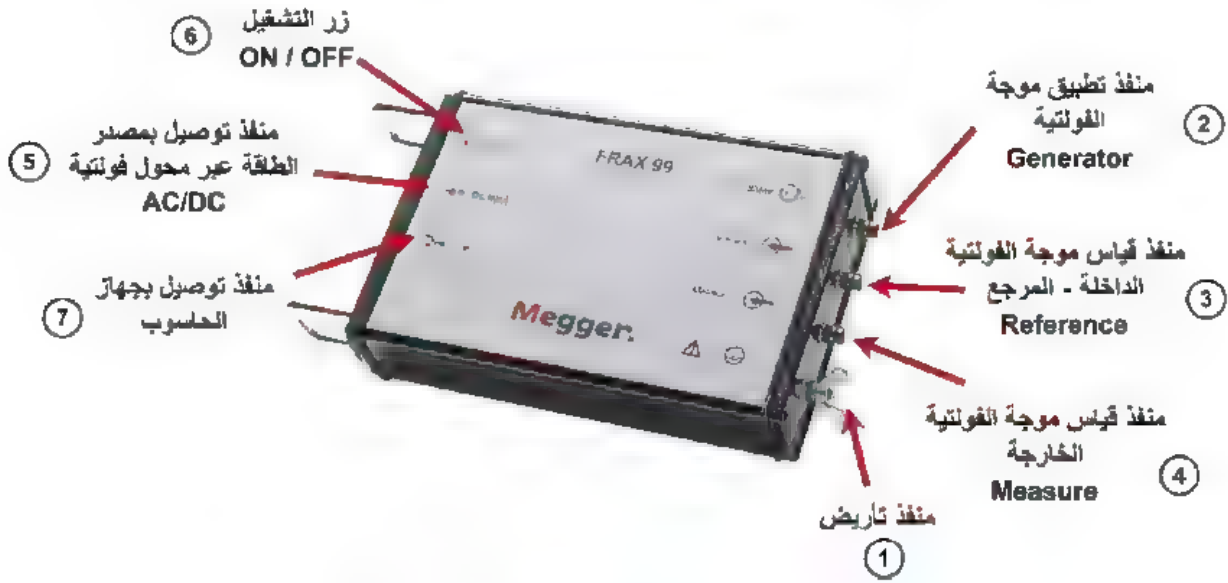


الشكل، رقم (8-1-1)

- مواصفات الجهاز: حسب الـ (FRAX Brochure)
 - فولتية المدخل الاسمية : 11 – 16 Vdc, 25 W
 - نطاق التردد : 0.1 Hz – 25 MHz
 - دقة التردد : 0.01%
 - الفولتية : 20 Vp-p
 - مُعاوقة المدخل : 50 Ω
 - مُعاوقة المخرج : 50 Ω
 - البيئة التشغيلية المحيطة : -4° F to 131° F (-20° C to 55° C) RH to 95%, Non condensing
 - البيئة التخزينية المحيطة : -22 to 158° F (-30 to +70°C)
 - أبعاد الجهاز : 250 x 169 x 52 mm
 - وزن الجهاز : 1.4 lb. (3.1 kg), without battery

• خطوات الفحص بواسطة هذا الجهاز:

1. التأكد من تطبيق الخطوات (5.1 إلى 5.9) الواردة في فقرة خطوات الفحص من فصل فحص تحليل الإستجابة الترددية المسحي (SFRA).
2. التأكد من أن الدائرة المراد فحصها غير مكهربة وعدم وجود احتمالية لكهربتها أثناء الفحص.
3. التأكد من أن أسلاك التوصيل الخاصة بجهاز الفحص (Test leads) وكذلك المشابك الخاصة بها (Clamps) في حالة جيدة وغير مُتسخة ولا تعاني من أية أضرار فيزيائية كالشقوق أو الكسور.
4. تجنب لمس دائرة الفحص أثناء إجراء الفحص أو بعده، إلا بعد التأكد من عدم وجود فولتية.
5. التأكد من أن جهاز الفحص المراد إستخدامه مُعاير (Calibrated).
6. قبل البدء بالفحص يُفضّل التعرّف على أجزاء جهاز الفحص من أضرار ومنافذ كما هو مُبين بالشكل (8-1-2)، بالإضافة للشكل (8-1-3) الذي يوضح الكوابل المُوردة مع جهاز الفحص.



الشكل رقم (8-1-2)

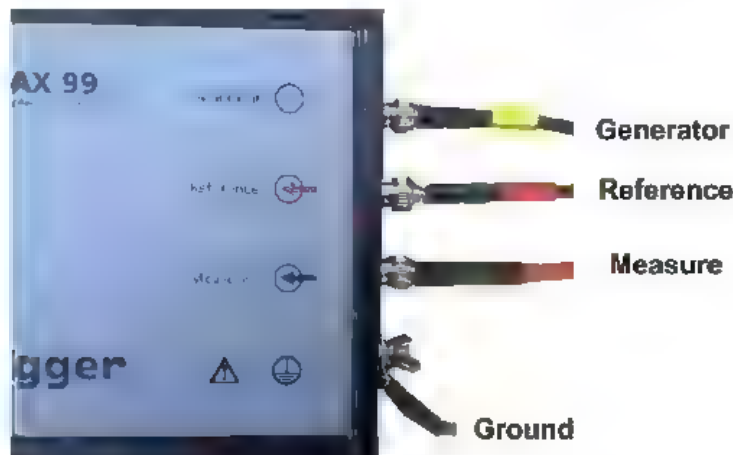


الشكل رقم (8-1-3)



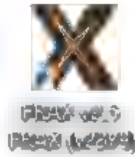
تحذير: لا تُقَم باستخدام جهاز الفحص في الأجواء القابلة للإنفجار، بالإضافة للأجواء الماطرة والمثلجة.

7. تهيئة منطقة الفحص عبر مراعاة الأمور التالية:
 - 7.1 التأكد من أن منطقة الفحص جافة قدر الإمكان.
 - 7.2 التأكد من عدم وجود مواد قابلة للإشتعال في منطقة الفحص.
 - 7.3 التأكد من التهوية الجيدة لمنطقة الفحص فيما إذا كانت مغلقة.
 - 7.4 التأكد من سلامة نظام التأريض في منطقة الفحص.
8. وصل جهاز الفحص بالأرض (Local station earth) عبر منفذ التأريض رقم (1) في الشكل (8-1-1) بواسطة الكيبل المُوَرَّد مع الجهاز من قِبَل الشركة المُصنَّعة. (يجب أن يكون كيبل التأريض أول كيبل يتم وصله بالجهاز وآخر كيبل يتم إزالته عن الجهاز).
9. التأكد من أن حزان المحول موصول بالأرض (Local station earth) عبر مسار تأريض ذو مُعاوقة قليلة (Low Impedance).
10. التأكد من أن كيبل الأرضي لمصدر الطاقة الكهربائي الخاص بجهاز الفحص موصول بالأرض (Local station earth) بمُعاوقة قليلة (Low Impedance) في حال عدم تشغيل الجهاز بالإعتماد على البطارية الخاصة به.
11. توصيل الكوابل بجهاز الفحص عبر المرباط من النوع (BNC connector) لكل من الكوابل التالية:
 - 11.1 توصيل كيبل مولد الموجة (Generator) المُشار إليه باللون الأصفر بالمنفذ رقم (2) المُبين في الشكل (8-1-2).
 - 11.2 توصيل كيبل قياس موجة المدخل المرجعية (Reference) المُشار إليه باللون الأحمر بالمنفذ رقم (3) المُبين في الشكل (8-1-2).
 - 11.3 توصيل كيبل قياس موجة المحرج (Measure) المُشار إليه باللون الأسود بالمنفذ رقم (4) المُبين في الشكل (8-1-2).



الشكل رقم (8-1-4)

12. توصيل أسلاك محول الفولتية (AC/DC) على منفذ مصدر الطاقة رقم (5) المُبين في الشكل (8-1-1) وكذلك توصيل محول الفولتية بمصدر الطاقة الرئيسي (AC)
13. توصيل جهاز الفحص بجهاز الحاسوب بواسطة كابل الـ (USB) عبر المنفذ رقم (8-1-7).
14. تشغيل الجهاز بواسطة زر التشغيل رقم (6) في الشكل (8-1-2).
15. تشغيل البرنامج الخاص بجهاز الفحص (FRAX v2.5) بالضغط على الأيقونة الظاهرة في الشكل (8-1-5) أدناه.



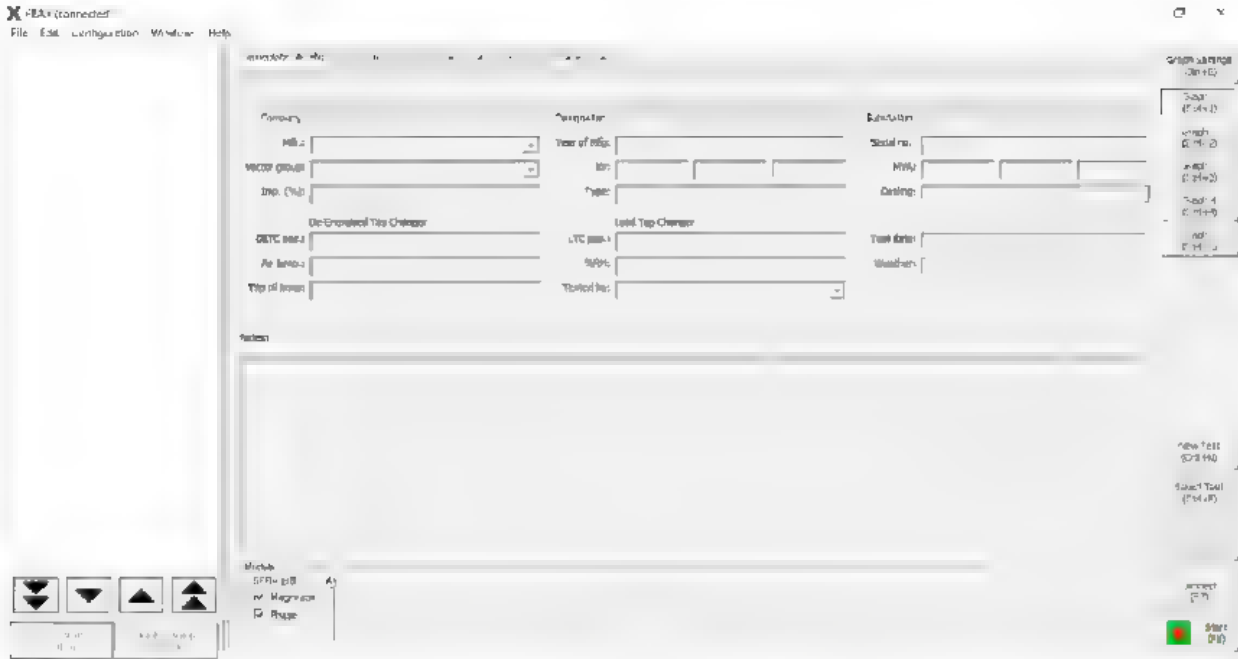
الشكل رقم (8-1-5)

16. بعد تشغيل البرنامج ستظهر الشاشة المُبينة في الشكل (8-1-6) والتي يظهر فيها على شريط العنوان (Title bar) أعلى الشاشة أن جهاز الفحص غير موصول بجهاز الحاسوب (FRAX (Disconnected)).



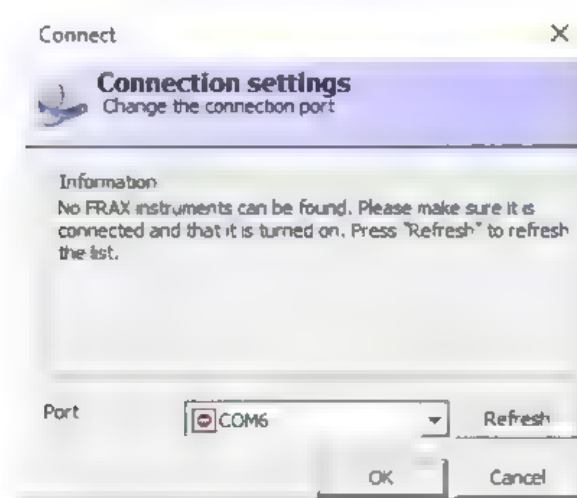
الشكل رقم (8-1-6)

17. نقوم بالضغط على زر (Connect) لتوصيل جهاز الفحص بجهاز الحاسوب لتتغير الحالة على شريط العنوان وتصبح (FRAX (Connected)) كما يظهر في الشكل (8-1-7).



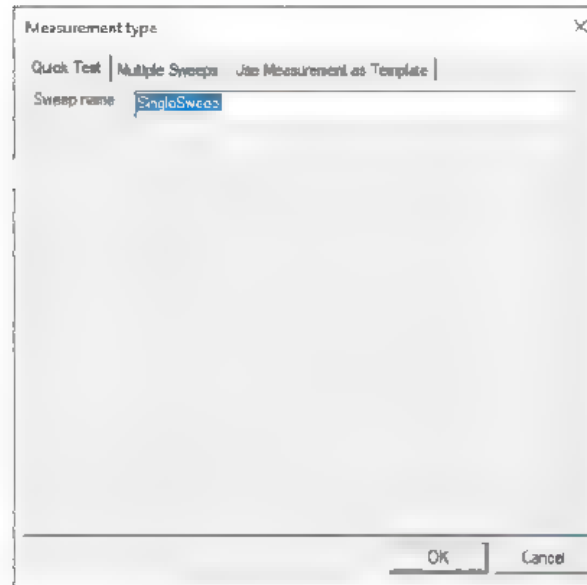
الشكل رقم (8-1-7)

في حال حدوث خطأ في التوصيل ستظهر النافذة الظاهرة في الشكل (8-1-8) أدناه، والتي منها يتم إختيار المنفذ المناسب وعادةً ما تكون هنالك علامة خضراء بجانب المنفذ بعد ذلك يتم الضغط على زر الموافقة (OK).



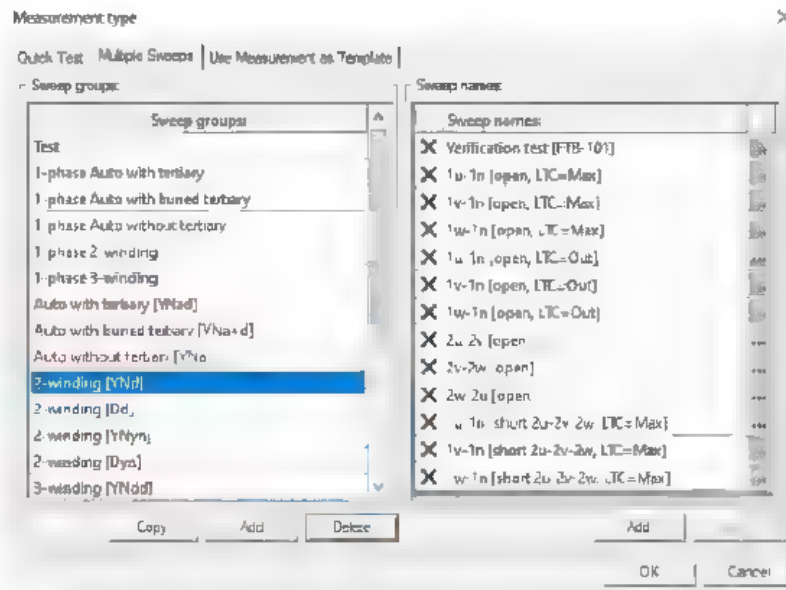
الشكل رقم (8-1-8)

18. تحديد إعدادات الفحص الجديد بالضغط على زر (New Test) الظاهر في الشكل (8-1-6) لتظهر النافذة المبينة في الشكل (8-1-9) والتي تكون على علامة التبويب (Quick Test) التي من خلالها يُمكن إجراء فحص واحد فقط (Single sweep).



الشكل رقم (8-1-9)

19. إختيار علامة التبويب (Multiple Sweeps) التي من خلالها يُمكن إجراء أكثر من فحص بحيث يتم تحديد الفحوصات والأساليب التي سيتم إجراء الفحص بها وفقاً لنوع المحول فيما إذا كان أحادي الطور أو ثلاثي الطور بالإضافة لعدد الملفات فيما إذا كان ثنائي الملفات أو ثلاثي الملفات كما يظهر بالشكل (8-1-10). حيث تم إختيار المحول ثلاثي الطور ثنائي الملفات ذو التوصيلة (Ynd) وبعد ذلك يقوم البرنامج بعرض بعض الأساليب التي يُمكن إجراء الفحص بها والتي يُمكن الإضافة عليها أو حذفها ومن ثم يتم الضغط على زر الموافقة (OK).



الشكل رقم (8-1-10)

20. بعد ذلك تظهر النافذة المُبينة بالشكل (8-1-11) والخاصة ببيانات المحول المراد فحصه بالإضافة لمعلومات البيئة المحيطة من درجة حرارة ورطوبة، ثم يتم الضغط على زر الموافقة (OK).

Unit1 - GSUT - 12/7/2022

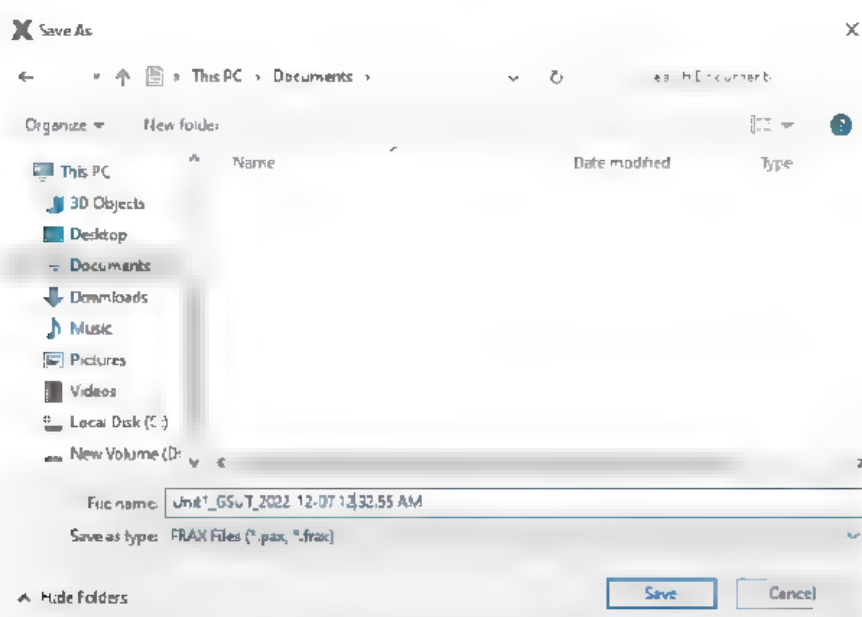
Company: Company	Designation: GSUT	Substation: Unit1
Mfr.: KONCAR	Year of Mfg: 2021	Serial no.: 11223355
Vector group: YNd11 (Y-D 30° lead)	kV: 400 20	MVA: 150
Imp (%): 9%	Type: Oil Immersed	Cooling: ONAF
De-Energized Tap Changer	Load Tap Changer	Test date: 12/07/2022
DTC pos:	LTC pos: 1	Weather: Cloudy
Air temp.: 25	%RH: 30%	
Top of temp: 24	Tested by: Mohammed Assaf	

Notes:

OK Cancel

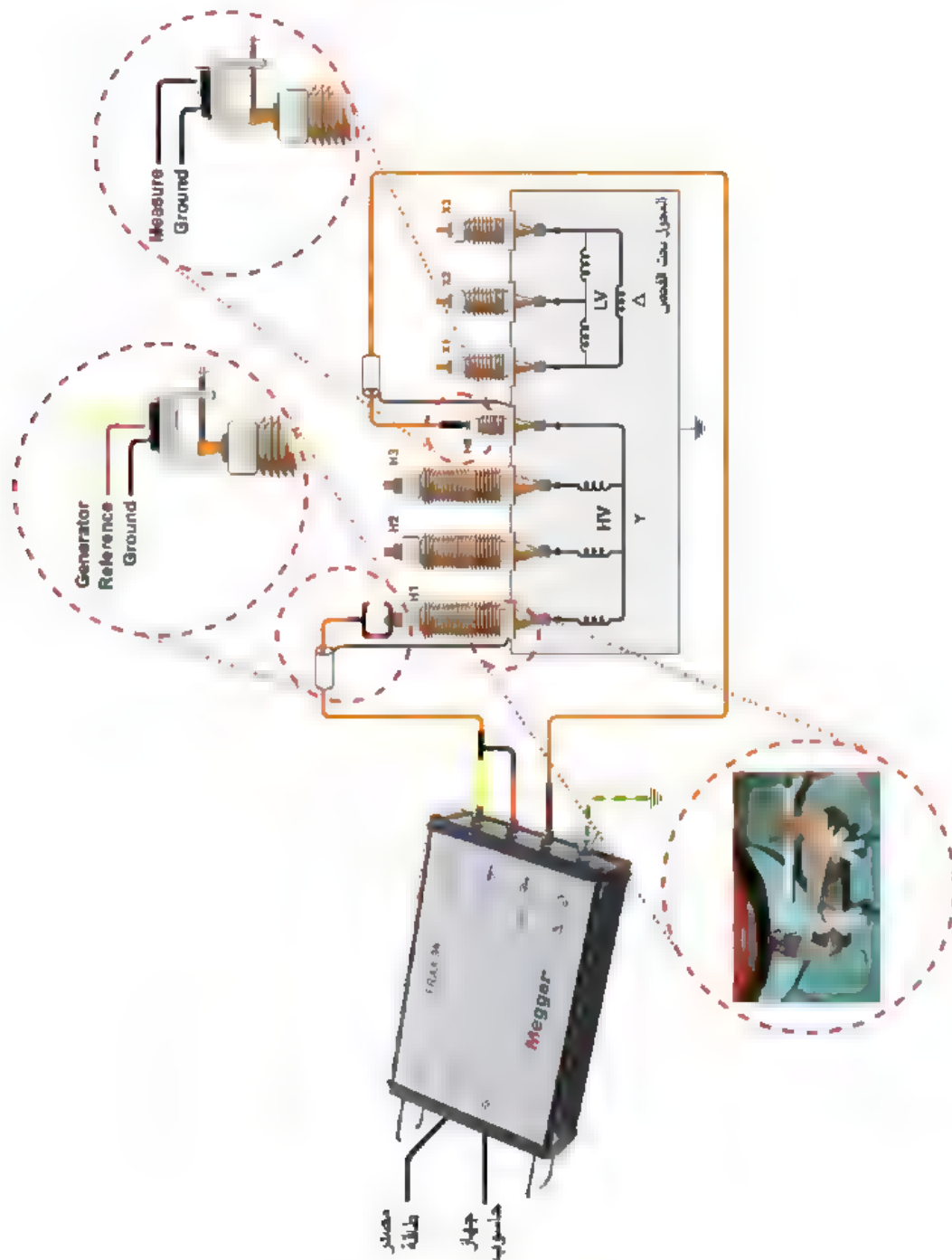
الشكل رقم (8-1-11)

21 بعد ذلك تظهر النافذة المُبينة بالشكل (8-1-12) والتي من خلالها يتم تحديد مكان حفظ ملف الفحص الجديد الذي تم إنشاؤه بصيغة (*.pax, *.frax) ومن ثم الضغط على زر حفظ (Save).



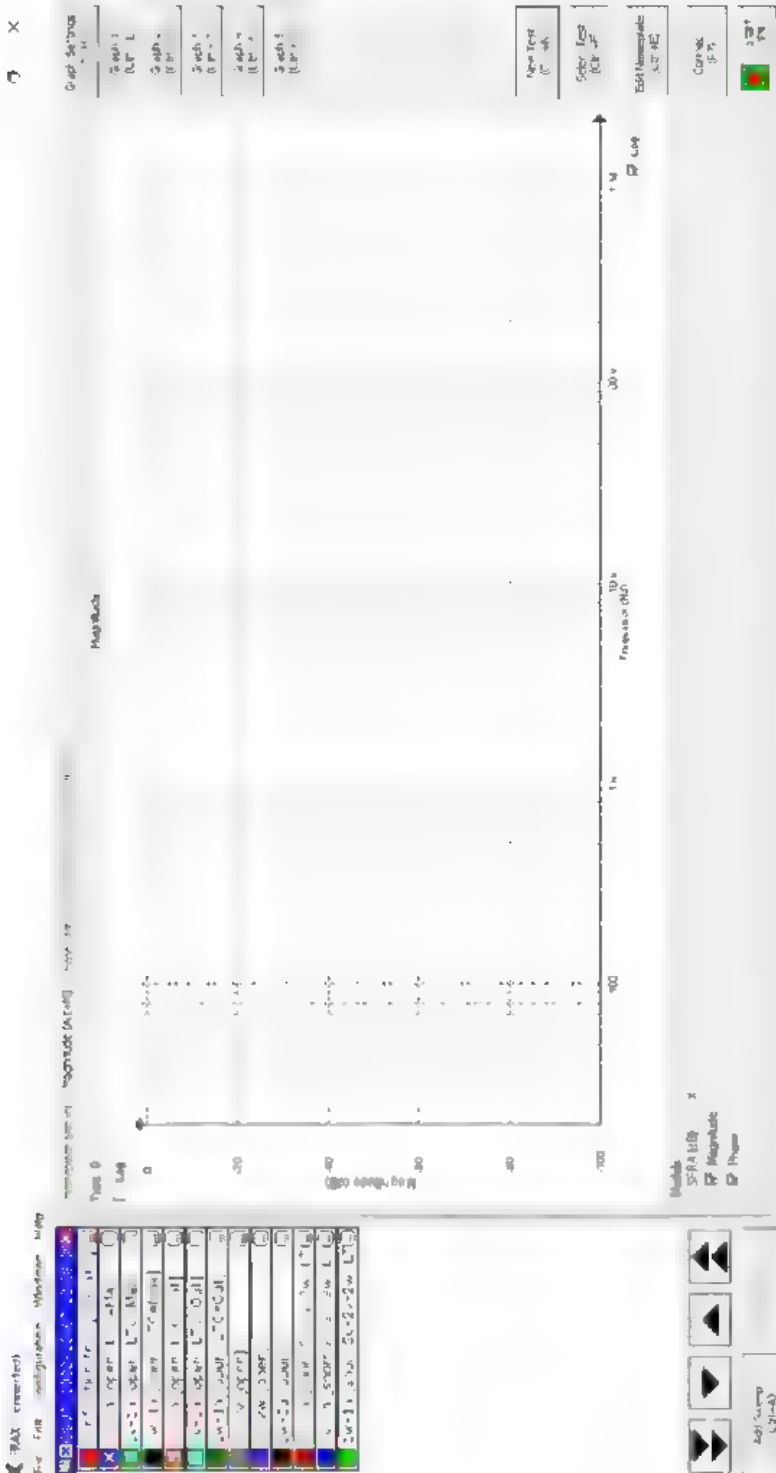
الشكل رقم (8-1-12)

22. توصيل كوابل الفحص بالمحول كما هو مٌبين بالشكل (8-1-13) والذي يوضح التوصيلة المناسبة للفحص على الطور الأول بأسلوب (End to end open circuit).



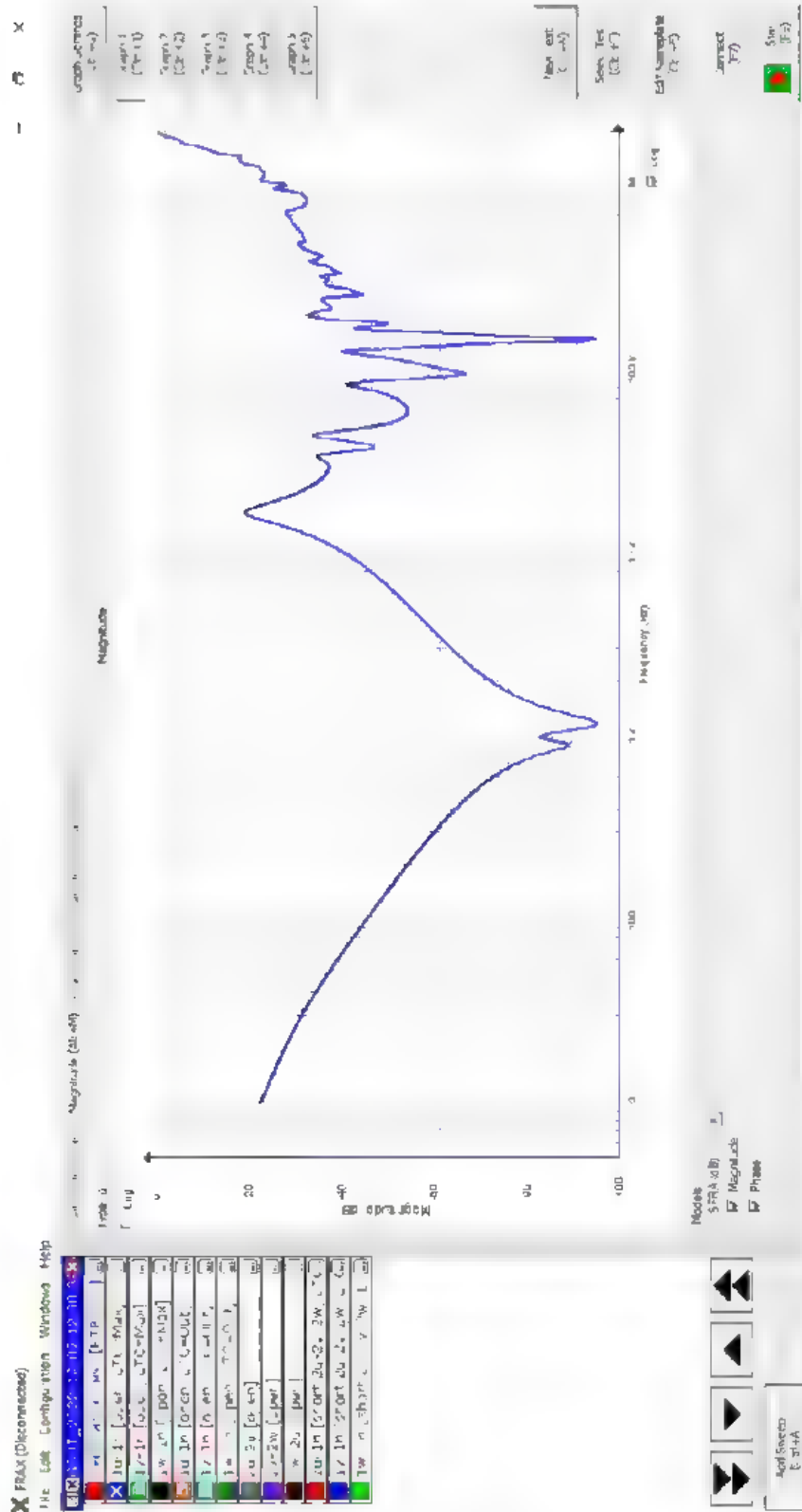
الشكل رقم (8-1-13)

ثم الضغط على زر بدء (Start) أسفل يمين الشاشة لبدء الفحص كما هو مبين بالشكل (8-1-14)



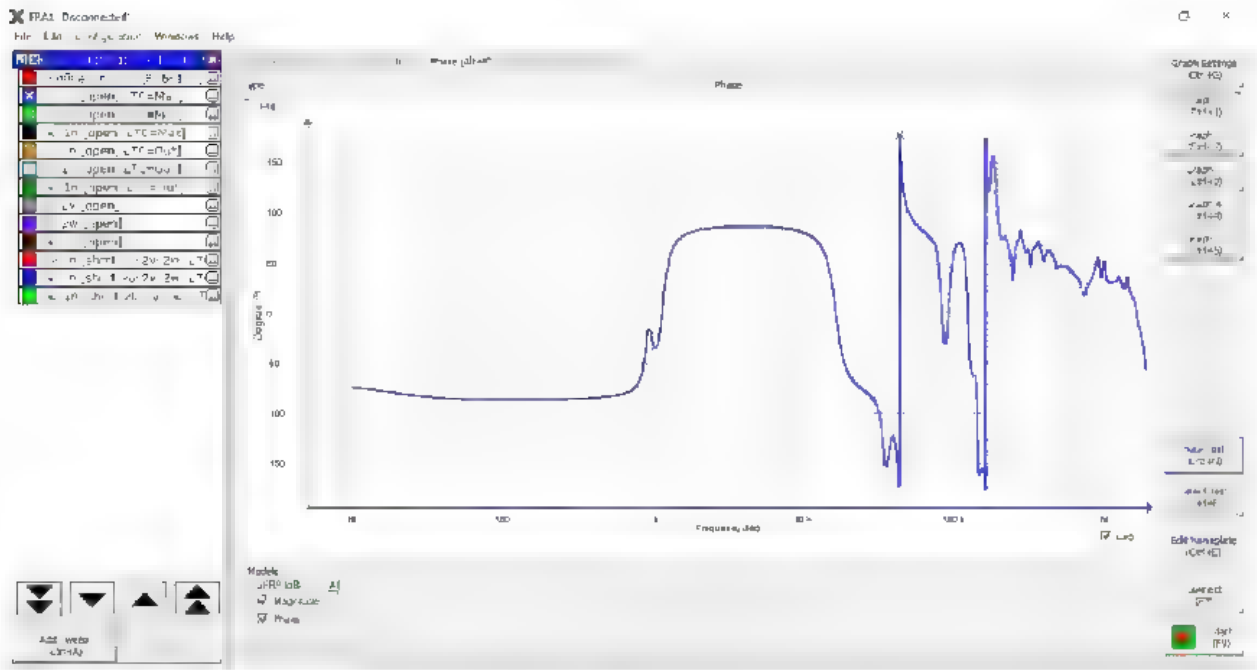
الشكل رقم (8-1-14)

24. بعد إنتهاء الفحص تظهر الرسمة المُبينة بالشكل (8-1-15) والخاصة برسمة السِعة أو المقدار (Magnitude) بعدها يُمكن الإنتقال للفحص التالي وإجراؤه بنفس الأسلوب



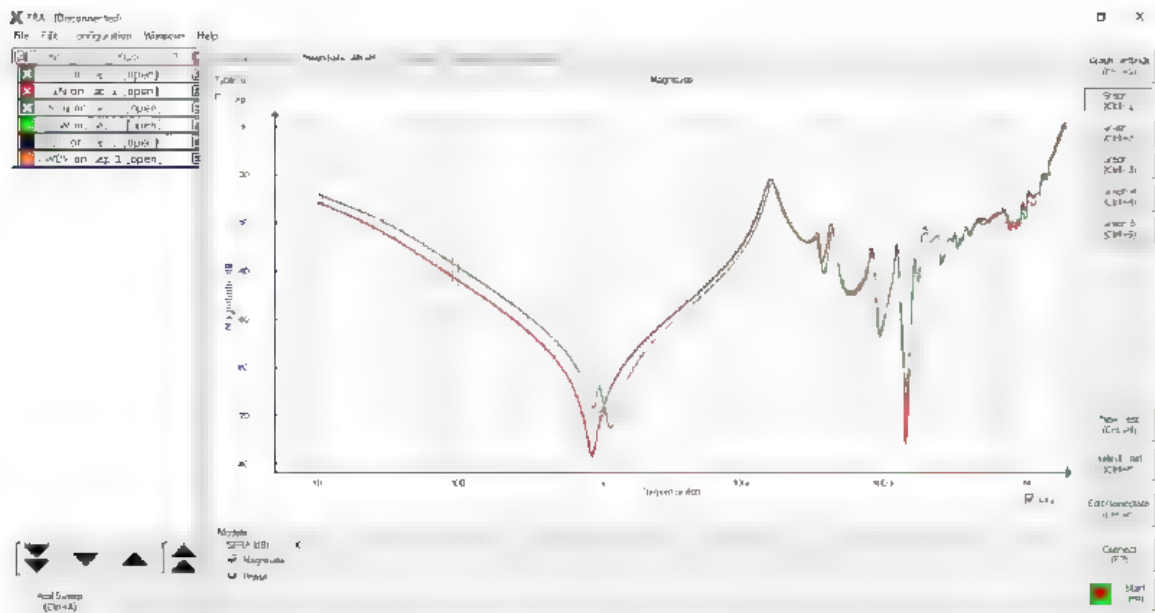
الشكل رقم (8-1-15)

أما فيما يخص رسمة فرق الطور (Phase) فإنه يُمكن الإنتقال إلى علامة التبويب (Phase) الظاهرة في الشكل (8-1-15) أعلاه للإنتقال لشاشة رسمة فرق الطور الظاهرة في الشكل (8-1-16)



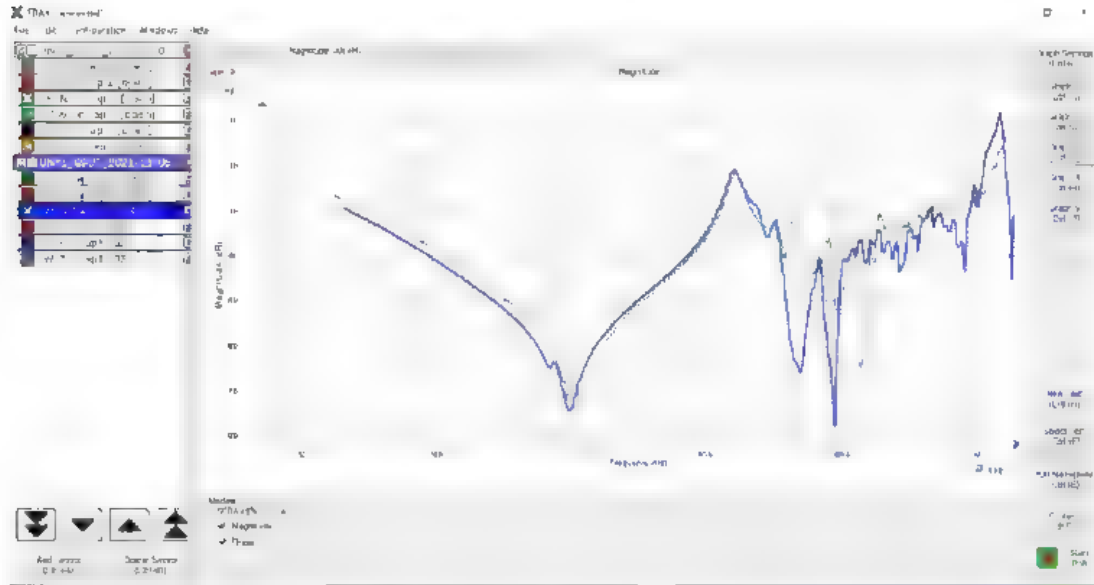
الشكل رقم (8-1-16)

25. يُمكن مقارنة نتيجة الفحص بين الأطوار الثلاثة وذلك بوضع علامة (x) في المربع الملون بجانب فحوصات الأطوار الثلاثة ليتم إسقاط نتائجها على نفس الرسمة لغايات المقارنة كما هو مُبين بالشكل (8-1-17).



الشكل رقم (8-1-17)

26. ولعمل مقارنة بين فحوصات سابقة بعد الإنتهاء من الفحص يتم تحميل ملف الفحوصات السابقة عن طريق قائمة ملف (File) وإختيار تحميل فحص (Load Test) بعدها تحديد الفحص السابق المراد تحميله ومن ثم الضغط على زر إفتح (Open) لتظهر لنا الشاشة المبينة بالشكل (8-1-18) والتي من خلالها يُمكن تحديد الفحوصات المراد مقارنتها ببعضها بوضع علامة (X) بجانب الفحص لتظهر رسمته



الشكل رقم (8-1-18)

ملحوظة: يدعم هذا الجهاز تشغيل ملفات الفحص ذات الإمتدادات المختلفة كتلك الصادرة عن أجهزة الفحص المُصنَّعة بواسطة شركات أخرى كشركة (Omicron) و (Doble) وغيرها من ملفات الفحص.



الملحق (2-8)

الجدول أدناه يُضم مُلخص لبعض أعطال المحولات وتأثيرها على نتيجة فحص الإستجابة الترددية وفقاً لمجموعة من المعايير والدراسات والنشرات الفنية كما ورد في أطروحة الدكتوراة في جامعة كوينزلاند.

[Mohd Yousof, Frequency Response Analysis for Transformer Winding Condition Monitoring – University of Queensland]

Components	Conditions	Frequency sensitivity
Main winding	Deformation within the main or top windings	20k to 400k
	Movement of the main and top winding	400k to 1M
	Bulk winding movement between windings and clamping structure	2k to 20k
	Axial deformations of each single winding	>400k
	Disc space variation	>100k
	Radial deformation or movement	>50k
		>100k
		5k to 500k
	Shorted turns	>200k
		<2k
		<10k
	Axial displacement	>500k
		>100k
Core	Core deformation	<2k
	Magnetic core and circuits	<10k
Test leads	Variations in grounding practices for test leads	>2M
Others	Poor grounding condition at site	>500k
	Ground impedance variation	400k to 1M
	Residual magnetism	<2k
	Bushings	>1m

الملحق (8-3)

يُضم الجدول أدناه الفحوصات التي يُمكن إجراؤها للمحولات ثلاثية الطور ثنائية الملفات (Three phase two winding) وثلاثية الطور ثلاثية الملفات (Three phase tertiary winding) وما يُنصح بإجراؤه على الأقل وفقاً لمعهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE, C57.149-2012].

المحولات ثلاثية الطور ثنائية الملفات

Table 1—Two winding transformers – 15 tests

Test type	Test #	3φ Δ-Y Group 2 $\theta \Rightarrow 30^\circ$ LAG	3φ Y-Δ Group 2 $\theta \Rightarrow 30^\circ$ LAG	3φ Δ-Δ Group 1 $\theta \Rightarrow 0^\circ$	3φ Y-Y Group 1 $\theta \Rightarrow 0^\circ$	1φ
HV Open Circuit (OC) All Other Terminals Floating	1	H1-H3	H1-H0	H1-H3	H1-H0	H1-H2 (H1-H0)
	2	H2-H1	H2-H0	H2-H1	H2-H0	
	3	H3-H2	H3-H0	H3-H2	H3-H0	
LV Open Circuit (OC) All Other Terminals Floating	4	X1-X0	X1-X2	X1-X3	X1-X0	X1-X2 (X1-X0)
	5	X2-X0	X2-X3	X2-X1	X2-X0	
	6	X3-X0	X3-X1	X3-X2	X3-X0	
Short Circuit (SC) Short [X1-X2-X3] ^a	7	H1-H3	H1-H0	H1-H3	H1-H0	H1-H2 Short [X1-X2] ^a
	8	H2-H1	H2-H0	H2-H1	H2-H0	
	9	H3-H2	H3-H0	H3-H2	H3-H0	
Capacitive Inter-Winding All Other Terminals Floating	10	H1-X1	H1-X1	H1-X1	H1-X1	H1-X1
	11	H2-X2	H2-X2	H2-X2	H2-X2	
	12	H3-X3	H3-X3	H3-X3	H3-X3	
Inductive Inter-Winding High (H) to Low (L) Ground (H- and X-) ^b	13	H1-X1	H1-X1	H1-X1	H1-X1	H1-X1 Ground [H2, X2]
	14	H2-X2	H2-X2	H2-X2	H2-X2	
	15	H3-X3	H3-X3	H3-X3	H3-X3	

^aIndicates short circuit tests terminals are shorted together but not grounded. The neutral is not included for 3φ Wye connections, but may be included for 1φ connections.

^bDenotes other end of winding, opposite of the reference and measure connections.

المحولات ثلاثية الطور ثلاثية الملفات الجزء الأول

Table 5—Three winding transformer Part 1 – 36 tests

Test type	Test #	3 ϕ Δ - Δ - Δ Group 1 $0 \rightarrow 0^\circ$	3 ϕ Δ - Δ -Y Group 2 $0 \Rightarrow 30^\circ$ LAG	3 ϕ Δ -Y- Δ Group 2 $0 \Rightarrow 30^\circ$ LAG	3 ϕ Δ -Y-Y Group 2 $0 \Rightarrow 30^\circ$ LAG	1 ϕ
HV Open Circuit (OC) All Other Term nals Floating	1	H1-H3	H1-H3	H1-H3	H1-H3	H1-H2 (H1-H0)
	2	H2-H1	H2-H1	H2-H1	H2-H1	
	3	H3-H2	H3-H2	H3-H2	H3-H2	
LV (X) Open Circuit (OC) All Other Terminals Floating	4	X1-X3	X1-X3	X1-X0	X1-X0	X1-X2 (X1-X0)
	5	X2-X1	X2-X1	X2-X0	X2-X0	
	6	X3-X2	X3-X2	X3-X0	X3-X0	
LV (Y) Open Circuit (OC) All Other Term nals Floating	7	Y1-Y3	Y1-Y0	Y1-Y3	Y1-Y0	Y1-Y2 (Y1-Y0)
	8	Y2-Y1	Y2-Y0	Y2-Y1	Y2-Y0	
	9	Y3-Y2	Y3-Y0	Y3-Y2	Y3-Y0	
Short Circuit (SC) High (H) to Low (X) Short [X1-X2-X3] ^a	10	H1-H3	H1-H3	H1-H3	H1-H3	H1-H0 Short [X1-X2] ^a
	11	H2-H1	H2-H1	H2-H1	H2-H1	
	12	H3-H2	H3-H2	H3-H2	H3-H2	
Short Circuit (SC) High (H) to Low (Y) Short [Y1-Y2-Y3] ^a	13	H1-H3	H1-H3	H1-H3	H1-H3	H1-H0 Short [Y1-Y2] ^a
	14	H2-H1	H2-H1	H2-H1	H2-H1	
	15	H3-H2	H3-H2	H3-H2	H3-H2	
Short Circuit (SC) Low (X) to Low (Y) Short [Y1-Y2-Y3] ^a	16	X1-X3	X1-X3	X1-X0	X1-X0	X1-X0 Short [Y1-Y2] ^a
	17	X2-X1	X2-X1	X2-X0	X2-X0	
	18	X3-X2	X3-X2	X3-X0	X3-X0	
Capacitive Inter-Winding High (H) to Low (X) All Terminals Float	19	H1-X1	H1-X1	H1-X1	H1-X1	H1-X1
	20	H2-X2	H2-X2	H2-X2	H2-X2	
	21	H3-X3	H3-X3	H3-X3	H3-X3	
Capacitive Inter-Winding High (H) to Low (Y) All Terminals Float	22	H1-Y1	H1-Y1	H1-Y1	H1-Y1	H1-Y1
	23	H2-Y2	H2-Y2	H2-Y2	H2-Y2	
	24	H3-Y3	H3-Y3	H3-Y3	H3-Y3	
Capacitive Inter-Winding Low (X) to Low (Y) All Terminals Float	25	X1-Y1	X1-Y1	X1-Y1	X1-Y1	X1-Y1
	26	X2-Y2	X2-Y2	X2-Y2	X2-Y2	
	27	X3-Y3	X3-Y3	X3-Y3	X3-Y3	
Inductive Inter-Winding High (H) to Low (X) Ground (H- and X-) ^b	28	H1-X1	H1-X1	H1-X1	H1-X1	H1-X1 Ground [H2, X2]
	29	H2-X2	H2-X2	H2-X2	H2-X2	
	30	H3-X3	H3-X3	H3-X3	H3-X3	
Inductive Inter-Winding High (H) to Low (Y) Ground (H- and Y-) ^b	31	H1-Y1	H1-Y1	H1-Y1	H1-Y1	H1-Y1 Ground [H2, Y2]
	32	H2-Y2	H2-Y2	H2-Y2	H2-Y2	
	33	H3-Y3	H3-Y3	H3-Y3	H3-Y3	
Inductive Inter-Winding Low (X) to Low (Y) Ground (X- and Y-) ^b	34	X1-Y1	X1-Y1	X1-Y1	X1-Y1	X1-Y1 Ground [X2, Y2]
	35	X2-Y2	X2-Y2	X2-Y2	X2-Y2	
	36	X3-Y3	X3-Y3	X3-Y3	X3-Y3	

^aIndicates short circuit tests: terminals are shorted together, but not grounded. The neutral is not included for 3 ϕ Wye connections, but may be included for 1 ϕ test connections.

^bDenotes other end of winding; opposite of the reference and measure connections.

المحولات ثلاثية الطور ثلاثية الملفات الجزء الثاني

Table 6—Three winding transformer Part 2 – 36 tests

Test type	Test #	3 ϕ Y-Y-Y Group 1 $\theta \Rightarrow 0^\circ$	3 ϕ Y-Y- Δ Group 2 $\theta \Rightarrow 30^\circ$ LAG	3 ϕ Y- Δ -Y Group 2 $\theta \Rightarrow 30^\circ$ LAG	3 ϕ Y- Δ - Δ Group 2 $\theta \Rightarrow 30^\circ$ LAG
HV Open Circuit (OC) All Other Terminals Floating	1	H1-H0	H1-H0	H1-H0	H1-H0
	2	H2-H0	H2-H0	H2-H0	H2-H0
	3	H3-H0	H3-H0	H3-H0	H3-H0
LV (X) Open Circuit (OC) All Other Terminals Floating	4	X1-X0	X1-X0	X1-X2	X1-X2
	5	X2-X0	X2-X0	X2-X3	X2-X3
	6	X3-X0	X3-X0	X3-X1	X3-X1
LV (Y) Open Circuit (OC) All Other Terminals Floating	7	Y1-Y0	Y1-Y2	Y1-Y0	Y1-Y2
	8	Y2-Y0	Y2-Y3	Y2-Y0	Y2-Y3
	9	Y3-Y0	Y3-Y1	Y3-Y0	Y3-Y1
Short Circuit (SC) High (H) to Low (X) Short [X1-X2-X3] ^a	10	H1-H0	H1-H0	H1-H0	H1-H0
	11	H2-H0	H2-H0	H2-H0	H2-H0
	12	H3-H0	H3-H0	H3-H0	H3-H0
Short Circuit (SC) High (H) to Low (Y) Short [Y1-Y2-Y3] ^a	13	H1-H0	H1-H0	H1-H0	H1-H0
	14	H2-H0	H2-H0	H2-H0	H2-H0
	15	H3-H0	H3-H0	H3-H0	H3-H0
Short Circuit (SC) Low (X) to Low (Y) Short [Y1-Y2-Y3] ^a	16	X1-X0	X1-X0	X1-X2	X1-X2
	17	X2-X0	X2-X0	X2-X3	X2-X3
	18	X3-X0	X3-X0	X3-X1	X3-X1
Capacitive Inter-Winding High (H) to Low (X) All Terminals Float	19	H1-X1	H1-X1	H1-X1	H1-X1
	20	H2-X2	H2-X2	H2-X2	H2-X2
	21	H3-X3	H3-X3	H3-X3	H3-X3
Capacitive Inter-Winding High (H) to Low (Y) All Terminals Float	22	H1-Y1	H1-Y1	H1-Y1	H1-Y1
	23	H2-Y2	H2-Y2	H2-Y2	H2-Y2
	24	H3-Y3	H3-Y3	H3-Y3	H3-Y3
Capacitive Inter-Winding Low (X) to Low (Y) All Terminals Float	25	X1-Y1	X1-Y1	X1-Y1	X1-Y1
	26	X2-Y2	X2-Y2	X2-Y2	X2-Y2
	27	X3-Y3	X3-Y3	X3-Y3	X3-Y3
Inductive Inter-Winding High (H) to Low (X) Ground (H- and X-) ^b	28	H1-X1	H1-X1	H1-X1	H1-X1
	29	H2-X2	H2-X2	H2-X2	H2-X2
	30	H3-X3	H3-X3	H3-X3	H3-X3
Inductive Inter-Winding High (H) to Low (Y) Ground (H- and Y-) ^b	31	H1-Y1	H1-Y1	H1-Y1	H1-Y1
	32	H2-Y2	H2-Y2	H2-Y2	H2-Y2
	33	H3-Y3	H3-Y3	H3-Y3	H3-Y3
Inductive Inter-Winding Low (X) to Low (Y) Ground (X- and Y-) ^b	34	X1-Y1	X1-Y1	X1-Y1	X1-Y1
	35	X2-Y2	X2-Y2	X2-Y2	X2-Y2
	36	X3-Y3	X3-Y3	X3-Y3	X3-Y3

^aIndicates short circuit tests: terminals are shorted together, but not grounded. The neutral is not included for Wye connections.

^bDenotes other end of winding; opposite of the reference and measure connections.

قائمة المصطلحات

يضم الجدول مجموعة من المصطلحات وفقاً لترتيب ورودها في هذا الكتاب، حيث تمت الترجمة بالإعتماد على معجم المصطلحات الخاص باللجنة الكهروتقنية الدولية (IEC) وتارة تبعاً للمراجع الكهربائية العربية وتارة أخرى بالإجتهد الشخصي، والهدف من تعريب المصطلحات زيادة الفهم ونسأل الله السداد

المصطلح بالإنجليزية	المصطلح بالعربية
Power transformer	محولات قدرة / قوى
Voltage	فولتية / جهد
AC	متردد / متناوب
DC	ثابت / مستمر
Rated	إسمي / كامل
Losses	ضباغات / خسائر / مفايد
HV winding	ملفات الفولتية المرتفعة
LV winding	ملفات الفولتية المنخفضة
Idea transformer	محول مثالي
Actual transformer	محول حقيقي / واقعي
Permeability	نفاذية
Iron core	القلب الحديدي
Hysteresis losses	الضباغات الهستيرية / التباطؤ
Leakage flux	الفيض المُتسرب / التسري
Eddy currents	تيارات دَوامية
Phasor diagram	المُخطط المُتجهي / الشُعاعي
Peak value	القيمة العُظمى
RMS	الجذر التربيعي لمتوسط القيم المُربعة
Angular speed	السرعة الزاوية
Magnetization Current	تيار تهيج / مغنطة
Residual magnetism	مغناطيسية مُتبقية
Stray losses	ضباغات شاردة
Circulating currents	تيارات دَوارة

عوازل إختراق / جُلْب	Bushings
خزان التمدد / التعويض	Conservator tank
مُشع / مبادل حراري	Radiator
فئة / نوع	Grade
حشِيّة / حلقات مطاطية	Gasket
درفلة / سحب	Rolling
رقائق / صفائح	Laminations
ساق / عامود	Limb
فكّ / مقرّن	Yoke
ورنيش	Varnish
مفاعلات حثية	Reactors
ممانعة	Reluctance
وصلة تناكبية	Butted joint
وصلة تناكبية متداخلة	Interleaved non-step butted joint
وصلة زاويّة	Mitred joint
مُغيّر الخطوة / الفولتية / المآخذ	Tap changer (OLTC or DETC)
راتنج / رزين	Resin
أنابيب شعرية	Capillary tubes
مؤشر / مُبين حرارة	Temperature indicator
فصل قسري	Trip
قرون / فجوة التفريغ	Arcing horn
حارفة / مانعة الصواعق	Surge Arrester
فحص غير تدميري	Non-destructive test
فحص قبول مصنعي	Factory Acceptance Test - FAT
فحص قبول موقعي	Site Acceptance Test - SAT
كهربية / شحن المحول	Transformer energization
تيار الشحن السعوي	Capacitive charging current
التيار الممتص من العازل	Dielectric absorption current
التيار المُتسرب / الموصل	Conduction or leakage current
تيار التفريغ الجزئي	Partial discharge current
تيار التسرب السطحي	Surface leakage current
مؤشر الإمتصاص	Absorption Index - AI
مؤشر الإمتصاص	Dielectric Absorption Ratio - DAR
مؤشر الإستقطاب	Polarization Index
فجوات هوائية	Voids

مجموعة التوصيل	Vector/Connection group
حالة اللاحمل	No-load
مُعاوِقة / مُمانعة القِصر	Short-circuit impedance
القدرة الفعالة	Active power
القدرة غير الفعالة	Reactive power
القدرة الظاهرية	Apparent power
معامل القدرة	Power Factor - PF
معامل التبديد	Dissipation Factor - DF
مُفاعلة التسرب	Leakage Reactance

قائمة المصادر

No.	Reference
1	Paul Gill, Electrical power equipment maintenance and testing second edition
2	Jill C. Duplessis, Electrical field tests for the life management of transformers
3	IEEE Std C57.12.00-2000 (Standard general requirements for liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers)
4	IEEE Std C57.12.00-2015 (Standard general requirements for liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers)
5	IEEE Std C57.12.80-2010 (Standard terminology for power and distribution transformers)
6	IEEE Std C57.12.90-2006 (Standard test code for liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers)
7	IEEE Std C57.12.90-2015 (Standard test code for liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers)
8	IEEE Std C57.104-2008 (Guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers)
9	IEEE Std C57.104-2019 (Guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers)
10	IEEE Std C57.106-2015 (Guide for acceptance and maintenance of insulating mineral oil in electrical equipment)
11	IEEE Std C57.131-2012 (Standard requirements for tap changers)
12	IEEE Std C57.152-2013 (Guide for diagnostic field testing of fluid-filled power transformers, regulators, and reactors)
13	IEEE Std C57.19-100-2012 (Guide for application of power apparatus bushings)
14	IEEE Std C57.19.00-2004 (Standard general requirements and test procedure for power apparatus bushings)
15	IEEE Std 1861-2014 (Guide for on-site acceptance tests of electrical equipment and system commissioning of 1000 kV AC and above)
16	IEEE Std 76-1974 (Guide for acceptance and maintenance of transformer Askarel in equipment)
17	IEEE Std 62-2005 (Guide for diagnostic field testing of electric power apparatus-part 1: Oil filled power transformers, regulators, and reactors)
18	IEEE C57.19.01-2017 (Standard for performance characteristics and dimensions for power transformer and reactor bushings)
19	IEEE C57.149-2012 (Guide for the application and interpretation of frequency response analysis for oil-immersed transformers)
20	IEEE Std 43-2013 (IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery)

- 21 IEC 60085-2007 Electrical insulation – Thermal evaluation and designation
- 22 IEC 60076-1 2011 Power transformers – Part 1: General
- 23 IEC 60137-2017 Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V
- 24 IEC, 60076-18 2012 Power transformers – Part 18: Measurements of frequency response
Mohammed W. Samara, Mohammed S. Assaf “The relationship between very fast transient and solids dielectric thermal breakdown” CIGRE conference, Apr 24, 2018
- 26 Dr. Mahmoud Al Jelani, Power Transformers
الأستاذ الدكتور محمود الجيلاني، المرجع في محولات القوى الكهربائية
- 27 Dr. Camelia Mohammad, Electrical transformers, part 1
الدكتورة كاميليا محمد، المحولات الكهربائية، الجزء الأول
- 28 ABB Ltd, Transformer handbook - 2004
- 29 ABB, Bushing diagnostics and conditioning - Product information 2750 515-142 en, Rev. 1
- 30 ABB, Service handbook for transformers
- 31 ABB, Testing of power transformers, routine tests, type tests and special tests
- 32 AREVA, Power transformers fundamentals, Vol. 1
- 33 AREVA, Power transformers Expertise, Vol. 2
- 34 CIGRE, Guide for transformer maintenance, 445, WGA2.34
- 35 Pavlos S. Georgilakis, Spotlight on Modern Transformer Design-Springer-Verlag (2009) London
- 36 James H. Harlow, Electric power transformer engineering, second edition
- 37 John Winders, Power transformers principles and applications
- 38 Janusz Turowski, Marek Turowski, Engineering electrodynamics electric machine, transformer, and power equipment design
- 39 Martin Heathcote, J & P Transformer Book, Thirteenth Edition
- 40 Purkait, Prithwiraj, Saha, Tapan Kumar, Transformer ageing monitoring and estimation techniques
- 41 William M. Flanagan, Handbook of transformer design and applications
- 42 Robert M. Del Vecchio, Bertrand Poulin, Pierre T. Feghali, Dilipkumar M. Shah, Rajendra Ahuja, Transformer design principles - with Applications to core-form power transformers
- 43 USA Bureau of Reclamation, Testing solid insulation of electrical equipment, Vol. 3-1
- 44 USA Bureau of Reclamation, Testing and maintenance of high voltage bushings, Vol. 3-2
- 45 USA Bureau of Reclamation, Transformer maintenance, Vol. 3-30
- 46 USA Bureau of Reclamation, Transformer diagnostics, Vol. 3-31

47	S. V. Kulkarni, S. A. Khaparde, Transformer engineering – design, technology, and diagnostic, second edition
48	Brandon Dupuis, An introduction to electrical diagnostic testing of power transformers
49	Bruce Hembroff, Matz Ohlen, Peter Werelius, A guide to transformer winding resistance measurements – Application information
50	MEGGER, Transformer winding resistance measurement – Application note
51	MEGGER, Instruction manual for 2.5/5 kV megohmmeter test set Biddle catalog No. 210400
52	MEGGER, Instruction manual AVTM55JD for TTR transformer turn ration test set No. 550005 series
53	MEGGER, The complete guide to electrical insulation testing
54	MEGGER, Instruction manual for transformer ohmmeter DC winding resistance test set MT0210 Catalog No. MT0210
55	MEGGER, Instruction manual AVTM830280 for transformer Ohmmeter Catalog No. 830280
56	MEGGER, Instruction manual AVTM672001 for DELTA-2000 10kV automated insulation test set Catalog No. 672001 Rev. B
57	MEGGER, 5kV 10kV 15kV insulation testing use of guard terminal – Application note
58	Matz Ohlen, Peter Werelius, A guide to transformer ratio measurements – Application note, MEGGER, 2010-01-18
59	EPRI, Power transformer maintenance and application guide -Final report, Sep. 2002
60	Jing Wang, Research and analysis based on transformer DC resistance measurement data – AIP conference proceedings 2066, 020040 (2019)
61	Kamran Dawood, Fatih Isik, Guven Komurgoz, Analysis and optimization of leakage impedance in a transformer with additional winding: A numerical and experimental study 2022
62	Jerry Janesch, Two-Wire vs. Four-Wire Resistance Measurements: Which Configuration Makes Sense for Your Application?
63	ELTEL Industries, Low voltage capacitance & tan delta testing, measurement method & application
64	Oleh W. Iwanziriv, ELTEL Industries, The art and science of measuring the winding resistance of power transformers.
65	Brandon Dupuis, A Systematic approach to analyzing exciting current measurements on power transformers – OMICRON
66	Brandon Dupuis, An introduction to electrical diagnostic testing of power transformers – IEEE 2016 ESMO Conference & Exposition Guide and Program – Sep. 2016

67	Alexander Herrera, Lukas Klingenschmid, Measurement of short-circuit impedance, leakage reactance and frequency response of stray losses on power transformers – Application note OMICRON
68	Bernard Hochart – Power Transformer Handbook-Butterworth-Heinemann (1987)
69	DOBLE, Doble test procedure 72A-2244 Rev. A
70	Gabriel Faria, Matheus Pereira, Gustavo Lopes, Jansen Villibor, Paulo Tavares, Ivan Faria, Evaluation of capacitance and dielectric dissipation factor of distribution transformers, Electrical Insulation Conference (EIC), San Antonio, TX, USA, 17-20 June 2018
71	CHAUVIN ARNOUX Group, Insulation resistance testing guide Ed.01 2010
72	Niclas Gronstrom, Optimal demagnetization of transformer after winding resistance measurements, KTH Royal institute of technology
73	A. P. Marques, C. H. B. Azevedo, J. A. L. dos santos, F. R. de C. Sousa, N. K. Moura, C. J. Ribeiro, Y. A. dias, A. Rodrigues, A. S. Rocha, Brito, Insulation resistance of power transformers – method for optimized analysis
74	A.L. Rockley, R. E. Clark, E.H. Povey, Field measurements of transformer excitation current as a diagnostic tool, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 4, April 1981
75	Martin Anglhuber, Dielectric analysis of high voltage power transformers – Application note, OMICRON
76	Florian Tschnn, Lukas Klingenschmid, Negative dissipation factor – Application note, OMICRON
77	Dept. of air force, Field guide for inspection, evaluation, and maintenance criteria for electrical transformers, 32-1282 Vol. 2 1999
78	Joong Chung Kim, The determination of transformer leakage reactance by using an impulse driving function
79	E. P. Dick, Transformer diagnostic testing by frequency response analysis, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, No. 6, Nov/Dec 1987
80	Richenbacher, Alan Gregg, Low voltage impulse testing of power transformers
81	Raka, Budo Milovic, OLTC dynamic testing
82	Ahmed Abu-Siada, Power transformer condition monitoring and Diagnosis, IET
83	William Taylor, Transformer practice manufacture, assembling, connection, operation, and testing
84	ANSI/NETA MTS-2007, Standard for maintenance testing specifications for electrical power distribution equipment and systems
85	OMICRON, Tetrano 600 user manual Version ENU 11610508
86	Daniel Carreno, Dinesh Chajer, Transformer turn ratio test: some unknown facts

87	Daniel Carreno, Dinesh Chajer, Transformer winding resistance measurement: field challenges
88	Brandon Dupuis, Typical excitation current phase patterns, Technical paper
89	Brandon Dupuis, Typical excitation current tap-changer patterns, Technical paper
90	C. de Jesus Ribeiro, A. P. Marques, C. H. B. Azevedo, D. C. P. Souza, B. P. de Alvarenga, and R. G. Nogueira, "Faults and defects in power transformers – a case study", 2009 IEEE Electrical Insulation Conference, pp. 142-145, 2009
91	ANSI/NETA ATS-2009. Standard for Acceptance Testing Specifications for. Electrical Power Equipment and Systems
92	M. Horning, Transformer Maintenance Guide, second edition
93	Mohd Yousof, Frequency response analysis for transformer winding condition monitoring – University of Queensland
94	CIGRE, Mechanical condition assessment of transformer windings using frequency response analysis (FRA) 342
95	MEGGER, FRAX99/101/150 Sweep frequency response analyzer user manual No. AC033582FE 2020
96	MEGGER, TTRU3 True 3 phase transformer turns ratiometer user manual TTRU3-UG-EN-V01 2020
97	METREL, TeraOhmXA 10kV MI 3210 insulation tester instruction manual No. 20752185 V1.4.4

نبذة عن الكاتب

- محمد صبحي عساف من مواليد الكويت عام 1989
- درس هندسة الطاقة الكهربائية في جامعة البلقاء التطبيقية (بوليتكنك)
- يعمل حالياً كمهندس صيانة كهربائية في شركة العطارات لتوليد الطاقة الكهربائية بواسطة الحرق المباشر للصخر الزيتي بإستطاعة توليدية كُلية قرابة 554 ميجاوات منذ عام 2019
- عمل كمهندس صيانة كهربائية في شركة السمرا لتوليد الكهرباء بإستطاعة توليدية كُلية قرابة 1241 ميجاوات (أكبر محطة توليد في الأردن) في الفترة ما بين 2012 إلى 2019
- عضو نقابة المهندسين الأردنيين (JEA)
- عضو معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE)
- حاصل على شهادة إحترافية في الصيانة والموثوقية (CMRP) من معهد مُحترفي الصيانة والموثوقية (SMRP).
- حاصل على شهادة إحترافية كخبير مُعتمد في أنظمة الطاقة لحالات الطوارئ (CEPSS) من الرابطة الوطنية للحماية من الحرائق (NFPA).
- حاصل على شهادة مُعتمدة في السلامة والصحة المهنية من إدارة السلامة والصحة المهنية الأمريكية (OSHA)، بالإضافة لمجموعة من الدورات التقنية داخل وخارج الأردن.
- المشاركة في فحوصات مصنعية وموقعية لمجموعة من محولات القدرة مختلفة السعة.
- المشاركة في مؤتمر سيجري باريس (CIGRE) لعام (2018).
- المشاركة في مؤتمر سيجري عمان (CIGRE) لعام (2018) بورقة بحثية مُشتركة تناولت دراسة حول إنفجار عازل إختراق 400 كيلوفولت (قائمة المصادر رقم [25])

م. محمد عساف

Mo7ammed.assaf1@gmail.com



LinkedIn

خبراء الصيانة الكهربائية



Facebook



LinkedIn

م. صالح البطاط



LinkedIn

(ردمك) 8-566-00-9923-978 ISBN